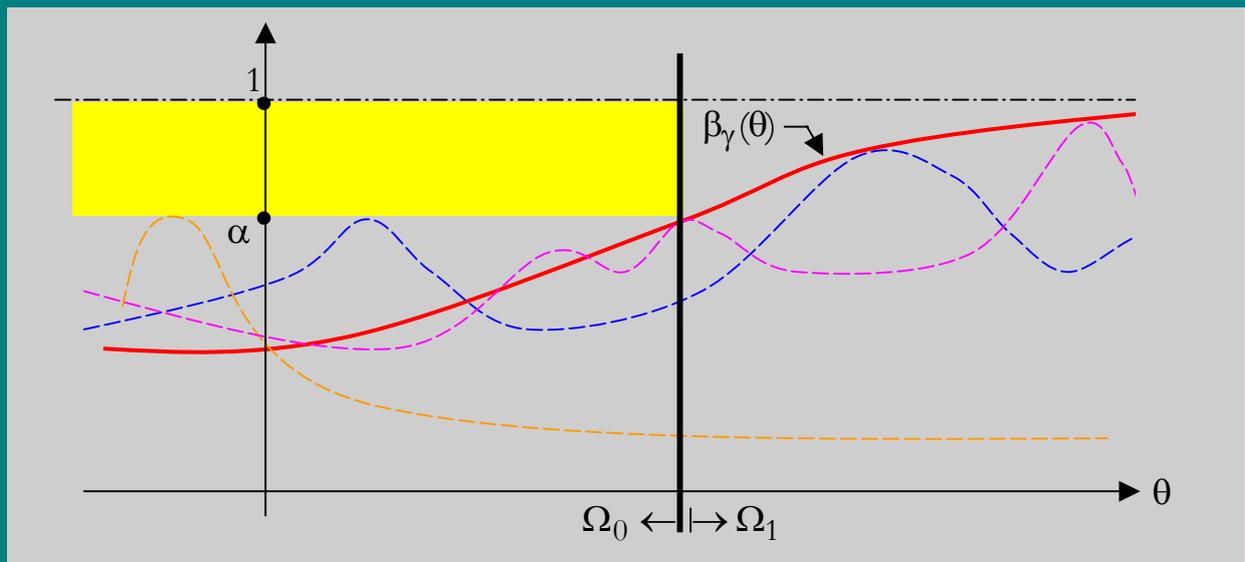


ESTADÍSTICA MATEMÁTICA

Volumen II Inferencia Estadística

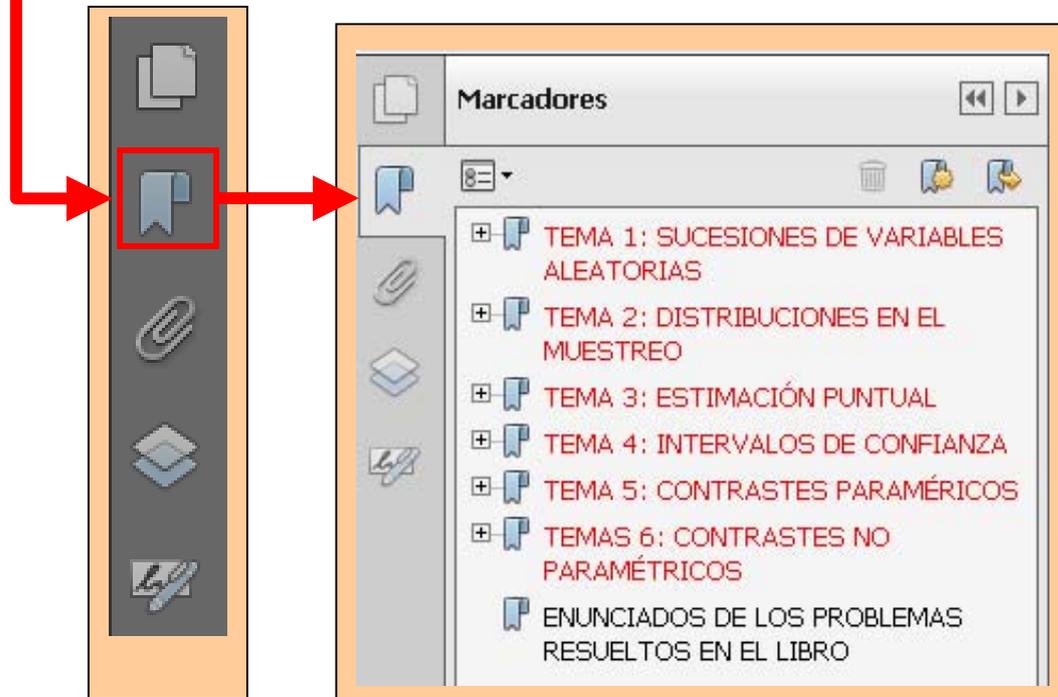


Rafael Cabrejas Hernansanz

→ fonemato.com

Aquí hay un videotutorial en el que explicamos los contenidos de este libro.

Haciendo clic aquí se abrirá el Panel de Marcadores y podrás navegar por el libro.



INTRODUCCIÓN A LA ESTADÍSTICA MATEMÁTICA

Volumen II: Inferencia Estadística

No está permitida la reproducción total o parcial de este libro, ni su tratamiento informático, ni la transmisión de ninguna forma o por cualquier medio, ya sea electrónico, mecánico, por fotocopia, por registro u otros métodos, sin permiso previo y por escrito de los titulares del Copyright.

© RAFAEL CABREJAS HERNANSANZ

Indice del Volumen I

Distribuciones de probabilidad

Tema 1: La probabilidad

- 1.01 Conjuntos
- 1.02 Álgebra de Boole de las partes de un conjunto
- 1.03 Experimento aleatorio
- 1.04 Espacio muestral, comportamiento elemental
- 1.05 Suceso
- 1.06 Operaciones con sucesos
- 1.07 Álgebra de sucesos
- 1.08 La probabilidad en el diccionario
- 1.09 La probabilidad para Kolmogorov
- 1.10 Definición frecuentista de probabilidad
- 1.11 La probabilidad para Laplace
- 1.12 Probabilidad condicionada
- 1.13 Independencia de sucesos
- 1.14 Teorema de la probabilidad total
- 1.15 Teorema de Bayes
- 1.16 Combinatoria
- **Latiguillos**

Tema 2: Variables unidimensionales

- 2.01 Variable aleatoria unidimensional
- 2.02 Variable aleatoria discreta
- 2.03 La palabra "densidad"
- 2.04 Variable aleatoria continua
- 2.05 Variable aleatoria degenerada
- 2.06 Esperanza matemática. El verbo "ponderar"
- 2.07 Momentos de una variable aleatoria
- 2.08 Variable tipificada
- 2.09 Teorema de Markov
- 2.10 Teorema de Tchebychef
- 2.11 Función generatriz de momentos
- 2.12 Función característica
- 2.13 Cambios de variable
- 2.14 Variable truncada
- **Latiguillos**

Tema 3: Variables multidimensionales

- 3.01 Variables multidimensionales
- 3.02 Función de distribución
- 3.03 Variable bidimensional discreta
- 3.04 Variable bidimensional continua
- 3.05 Distribuciones marginales
- 3.06 Distribuciones condicionadas
- 3.07 Variables independientes
- 3.08 Esperanza matemática
- 3.09 Momentos de una variable bidimensional
- 3.10 Regresión
- 3.11 Rectas de regresión mínimo cuadrática
- 3.12 Función generatriz de momentos
- 3.13 Cambios de variable
- 3.14 Funciones de variable bidimensional

- **Latiguillos**

Tema 4: Variables discretas famosas

- 4.01 Variable degenerada
- 4.02 Variable uniforme discreta
- 4.03 Variable de Bernoulli
- 4.04 Variable binomial
- 4.05 Variable de Poisson
- 4.06 Variable geométrica
- 4.07 Variable binomial negativa
- 4.08 Variable hipergeométrica

- **Latiguillos**

Tema 5: Variables continuas famosas

- 5.01 Variable uniforme continua
- 5.02 Variable normal tipificada
- 5.03 Variable normal no tipificada
- 5.04 Reproductividad de la normal
- 5.05 Variable logarítmico normal
- 5.06 Variable gamma
- 5.07 Variable exponencial negativa
- 5.08 Variable beta
- 5.09 Variable ji-dos
- 5.10 Variable t-Student
- 5.11 Variable F-Snedecor
- 5.12 Variable de Pareto

- **Latiguillos**

Índice del Volumen II

Inferencia Estadística

Tema 1: Sucesiones de variables

- 1.01 Introducción
- 1.02 Sucesión de variables aleatorias
- 1.03 Convergencia de una sucesión
- 1.04 Teorema de Bernouilli
- 1.05 Teorema Central del Límite
- 1.06 Teorema de Lindeberg-Levy
- 1.07 Teorema de Moivre

Tema 2: Distribuciones en el muestreo

- 2.01 Muestreo aleatorio simple
- 2.02 Estadístico
- 2.03 Estadísticos más famosos
- 2.04 La media muestral
- 2.05 La varianza muestral
- 2.06 Muestreo de población normal

Tema 3: Estimación puntual

- 3.01 Estimador puntual
- 3.02 Insesgadez
- 3.03 Verosimilitud de una muestra
- 3.04 Conjuntos de nivel de un campo escalar
- 3.05 Suficiencia
- 3.06 Eficiencia
- 3.07 Consistencia
- 3.08 Estimador de momentos
- 3.09 Estimador de máxima verosimilitud

Tema 4: Intervalos de confianza

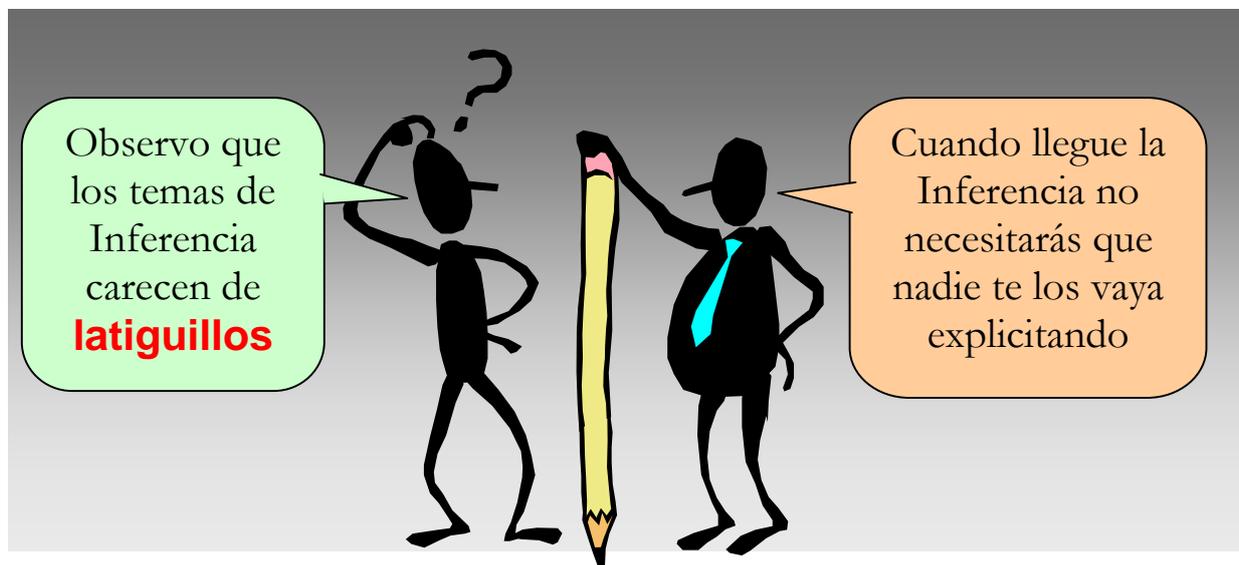
- 4.01 Introducción
- 4.02 Intervalo aleatorio
- 4.03 IC para la media de una normal
- 4.04 IC para la varianza de una normal
- 4.05 IC para la diferencia de medias de normales
- 4.06 IC para el cociente de varianzas de normales
- 4.07 IC para la media mediante Tchebychef
- 4.08 IC con muestras grandes

Tema 5: Contrastes paramétricos

- 5.01 Hipótesis. Tipos
- 5.02 Hipótesis nula y alternativa
- 5.03 Test de hipótesis. Región crítica
- 5.04 Los dos tipos de error
- 5.05 Función de potencia de un test
- 5.06 Tamaño de un test
- 5.07 Test UMP
- 5.08 Contraste de hipótesis simples
- 5.09 Contraste de simple frente a compuesta
- 5.10 Contraste de hipótesis compuestas
- 5.11 Test de la razón de verosimilitudes
- 5.12 Test famosos para poblaciones normales

Tema 6: Contrastes no paramétricos

- 6.01 Contraste de aleatoriedad
- 6.02 El estadístico χ^2 de Pearson
- 6.03 Contrastes de bondad de ajuste
- 6.04 Contraste de independencia
- 6.05 Contraste de homogeneidad



Tema 1

Sucesiones de variables aleatorias

- 1.01 Introducción
- 1.02 Sucesión de variables aleatorias
- 1.03 Convergencia de una sucesión
- 1.04 Teorema de Bernouilli
- 1.05 Teorema Central del Límite
- 1.06 Teorema de Lindeberg-Levy
- 1.07 Teorema de Moivre

En fonemato.com tienes los vídeos en los que explicamos los contenidos de este libro.

Lo más valioso de tu educación científica es el desarrollo de la **disciplina mental**



1.1 INTRODUCCIÓN

El verbo "inferir"

Como en las próximas 500 páginas estudiaremos la llamada Inferencia Estadística, conviene empezar leyendo lo que dice el diccionario sobre el verbo **inferir**, pues lo que a nosotros nos interesa es la primera acepción.

Inferir. (Del latín *infere*, llevar a):

Sacar una consecuencia o deducir una cosa de otra || Llevar consigo, ocasionar, conducir a un resultado || Tratándose de ofensas, agravios, heridas, etc., producirlos o causarlos.

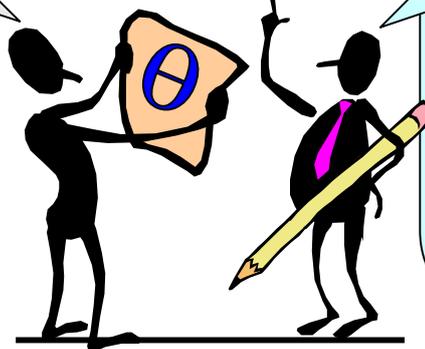
Inferencia paramétrica

Como la vida es muy dura, con frecuencia **se está analizando una variable aleatoria "X" asociada a una cierta población** (imagina que "X" expresa la aleatoria altura de los ciudadanos) **y se conoce "X" sólo de forma parcial, pues aunque se sabe a qué "familia" pertenece "X", se desconocen algunos de los parámetros que identifican a "X".**

Por ejemplo:

- Se sabe que "X" es normal de media 7, pero se desconoce la varianza.
- Se sabe que "X" es normal de varianza 13, pero se desconoce la media.
- Se sabe que "X" es exponencial, pero se desconoce el parámetro.
- Se sabe que "X" es normal, pero se desconocen la media y la varianza.

Desconocer algún parámetro θ de la distribución de probabilidad de "X" es una **gran putada**, pues me impide calcular probabilidades de sucesos relacionados con "X" voy a llamar al mago Merlín para que me diga el valor de θ



No te molestes en preguntar a nadie, el valor de θ es imposible conocerlo, no lo sabe ni Dios

Ante tan dramática situación sólo tenemos dos opciones:

- 1) Suicidarnos
- 2) Buscarnos la vida para "decir algo" sobre θ

Si no eliges la primera opción, de inmediato te planteas la pregunta del millón:

¿Qué hago para "decir algo" sobre θ ?

Tema 1: Sucesiones de variables aleatorias

© Rafael Cabrejas Hernansanz

Detallada respuesta

Lo que haría cualquiera: **observar el valor que toma "X" en "n" individuos de la "población"** (o sea, "muestrear" la población) **y sacar jugo a la información que sobre el parámetro θ contienen los "n" valores observados de la variable "X"**. Así nace la estrella de la Inferencia Estadística: la variable aleatoria n-dimensional $(X_1; \dots; X_n)$ que expresa los resultados que pueden presentarse al seleccionar una muestra de tamaño "n"; de ella diremos que es la **variable muestral**.

El **muestreo aleatorio simple** considera que las variables X_1, \dots, X_n que forman la variable muestral $(X_1; \dots; X_n)$ son independientes y tienen la misma distribución de probabilidad que la variable "X". **Por ejemplo**, si $X \approx N(170; \sigma)$ expresa la aleatoria altura de los ciudadanos y para "decir algo" sobre σ tomamos una muestra aleatoria simple de tamaño 3, entonces, siendo X_i la variable que expresa la aleatoria altura del i-ésimo ciudadano seleccionado ($i = 1, 2, 3$), la estrella de la película será la variable muestral $(X_1; X_2; X_3)$ que expresa los resultados que pueden presentarse, y admitiremos que X_1, X_2 y X_3 son independientes y todas tienen distribución $N(170; \sigma)$.

A continuación comentamos grosso modo la que se nos viene encima.

Tema 1: Sucesiones de variables aleatorias

Como la estrella de la historia es la variable muestral $(X_1; \dots; X_n)$ y "n" puede ser todo lo grande que queramos, dedicaremos el Tema 1 a estudiar los intrínquilos de una sucesión $X_1, X_2, \dots, X_n, \dots$ de infinitas variables aleatorias (independientes o no, con la misma distribución de probabilidad o no).

Tema 2: Estadísticos

Para "sacar jugo" a la "información" que sobre el desconocido θ contienen los "n" valores observados de la variable "X" utilizaremos **estadísticos**. Nada de asustarse, un "estadístico" es una función de la variable muestral $(X_1; \dots; X_n)$, y por tanto es una variable aleatoria unidimensional corriente y moliente. Los estadísticos más famosos son la **media muestral** y la **varianza muestral**:

$$T_1 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n X_i \equiv \text{aleatoria media muestral}$$

$$T_2 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (X_i - T_1)^2 \equiv \text{aleatoria varianza muestral}$$

Observa: a cada muestra le corresponde un valor del estadístico. **Por ejemplo**, si la muestra seleccionada es la (4;6;11), en ella el estadístico T_1 se concreta en el número 7, y el estadístico T_2 se concreta en el número 26/3:

$$T_1 = (4 + 6 + 11)/3 = 7$$

$$T_2 = ((4 - 7)^2 + (6 - 7)^2 + (11 - 7)^2)/3 = 26/3$$

Tema 1: Sucesiones de variables aleatorias

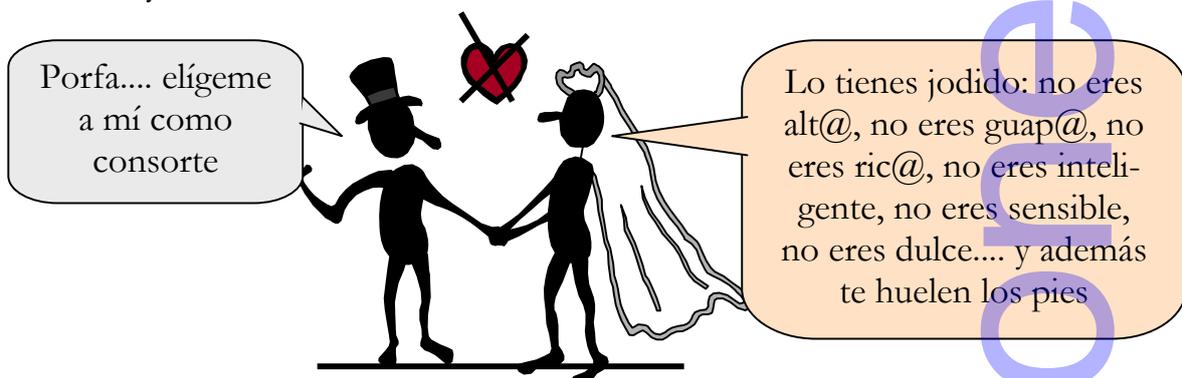
Tema 3: Estimación puntual

Hacer una estimación puntual del parámetro θ consiste en asignarle un valor concreto. Para ello se elige un estadístico "T" y se asigna a θ el valor que toma "T" en la muestra seleccionada.

Por ejemplo, considera que la variable "X" tiene distribución de Poisson de parámetro θ y que para hacer una estimación puntual de θ se toma una muestra de tamaño 4 y se obtiene la (5;6;1;6); así:

- Si como "estimador puntual" del parámetro θ elegimos el estadístico media muestral $T_1 = (X_1 + X_2 + X_3 + X_4)/4$, como el valor que toma T_1 en la muestra (5;6;1;6) es 4'5, diremos que la estimación puntual de θ que para esa muestra proporciona el estadístico T_1 es $\theta = 4'5$.
- Si como "estimador puntual" del parámetro θ elegimos el estadístico "máximo muestral" $T_3 = \text{máx.}\{X_1; X_2; X_3; X_4\}$, como el valor que toma T_3 en la muestra (5;6;1;6) es 6, diremos que la estimación puntual de θ que para esa muestra proporciona el estadístico T_3 es $\theta = 6$.
- Si como "estimador puntual" del parámetro θ elegimos el estadístico "mínimo muestral" $T_4 = \text{mín.}\{X_1; X_2; X_3; X_4\}$, como el valor que toma T_4 en la muestra (5;6;1;6) es 1, diremos que la estimación puntual de θ que para esa muestra proporciona el estadístico T_4 es $\theta = 1$.

Naturalmente, una vez seleccionada la muestra, la "calidad" de la estimación puntual de θ dependerá de qué estadístico usemos como "estimador puntual"; por eso se hace necesario establecer características "deseables" (**insesgadez, consistencia, eficiencia y suficiencia**) que nos permitan decidir si un cierto estadístico "Pepe" es interesante para hacer una "estimación puntual" del desconocido valor de θ . La idea es sencilla: cuando el estadístico "Pepe" nos suplique por sus muertos que lo elijamos a él como "estimador puntual" de θ , analizaremos si "Pepe" posee esas características "deseables" de insesgadez, consistencia, eficiencia y suficiencia.



Como no podemos pasarnos la vida haciendo casting con la infinidad de estadísticos que hay, se hará necesario inventar métodos de "construcción" de estimadores (**método de la máxima verosimilitud y método de los momentos**).

Tema 4: Estimación con intervalo de confianza

Abordaremos el problema de "decir algo" sobre el parámetro θ desde otro punto de vista, pues en vez de utilizar un estadístico y los "n" números que forman la muestra seleccionada para hacer una "estimación puntual" de θ , **utilizaremos un estadístico y los "n" números de la muestra para determinar un intervalo en el que con una confianza fijada de antemano está el desconocido valor del parámetro θ .**

Tema 5: Contraste de hipótesis paramétricas

Por razones de elemental prudencia, una vez se ha estimado θ (y por tanto se ha establecido una **hipótesis** sobre θ), se plantea el problema de **contrastar** si la estimación realizada tiene mucho o poco que ver con la realidad. Y de inmediato se **plantea la pregunta del millón**:

¿Qué hago para "contrastar" una "hipótesis" establecida sobre θ ?

Respuesta:

Lo que haría cualquiera: "observar" el valor que toma "X" en "k" individuos de la "población" y "sacar jugo" a la "información" que sobre el parámetro θ contienen los "k" valores observados de la variable "X"; en concreto, utilizando un estadístico y los "k" números que forman la muestra seleccionada, obtendremos un número mágico que nos permitirá decidir si nos creemos la hipótesis establecida o no.

Inferencia no paramétrica

Siempre hay quien lo tiene más jodido: **se está analizando una variable aleatoria "X" asociada a una cierta "población" y no se tiene ni idea de la distribución de probabilidad de "X".**



En tal situación, la única alternativa al suicidio es emplear el olfato para establecer una **hipótesis sobre el tipo de distribución de "X"** y "observar" el valor que toma "X" en "r" individuos de la "población", sacando jugo a la "información" que contienen los "r" valores observados de la variable "X"; en concreto, utilizando un estadístico y los "r" números que forman la muestra seleccionada, obtendremos un número mágico que nos permitirá decidir si nos creemos la hipótesis establecida o no. Dedicaremos el Tema 6 a tan divertido asunto.

Tema 1: Sucesiones de variables aleatorias

1.2 SUCESIÓN DE VARIABLES ALEATORIAS

Una sucesión de variables aleatorias es una ley o criterio que a cada número natural le asocia una variable aleatoria.

Denotando X_n a la variable aleatoria que la ley en cuestión asocia al número natural "n", para referirnos a la sucesión escribiremos $\{X_n\}$; es decir:

$$\{X_n\} = \{X_1, X_2, X_3, \dots, X_n, \dots\}$$

$$\begin{array}{lcl} 1 & \rightarrow & X_1 \\ 2 & \rightarrow & X_2 \\ 3 & \rightarrow & X_3 \\ : & \rightarrow & : \\ n & \rightarrow & X_n \\ : & \rightarrow & : \end{array}$$

MURPHY FOR PRESIDENT

- **Ley de Murphy:** si algo puede ir mal, irá mal.
- **Sexto lema de Murphy:** nada es tan fácil como parece.
- **Quinto teorema de Murphy:** si dejamos que las cosas marchen solas, irán de mal en peor.
- **Tercer axioma de Murphy:** cuando las cosas no pueden ser peores, empeoran.
- **Ley de Murphy multidimensional:** si una serie de eventos pueden salir mal, lo harán en el peor orden posible.
- **Cuarto teorema de Murphy:** lo único que no se olvida es lo que se apunta.
- **Observación de Murphy:** para estimar el tiempo que requiere una tarea, estímate el tiempo que debería requerir, multiplíquese por dos y elévese la medición a la mayor unidad subsiguiente. Así, asignamos dos días para una tarea de una hora.
- **Segundo axioma de Murphy:** todo horror que pueda deslizarse no dudará en hacerlo.
- **Cuarto postulado de Murphy:** sólo se hace bien lo que se ha practicado suficientemente.
- **Comentario de Fonemato:** Murphy es muy optimista.

1.3 CONVERGENCIA DE UNA SUCESIÓN DE VARIABLES ALEATORIAS

Sea "U" una variable aleatoria con función de distribución $F(x)$ y generatriz de momentos $\Phi(t)$:

$$F(x) = P(U \leq x) ; \Phi(t) = E(e^{t \cdot U})$$

Sea $\{X_n\}$ una sucesión de variables aleatorias definidas sobre el mismo espacio probabilístico que "U", siendo $F_n(x)$ y $\Phi_n(t)$ las respectivas funciones de distribución y generatriz de momentos de la variable X_n :

$$F_n(x) = P(X_n \leq x) ; \Phi_n(t) = E(e^{t \cdot X_n})$$

Convergencia en ley

Diremos que la sucesión $\{X_n\}$ **converge en ley** a la variable "U", y escribiremos $\{X_n\} \xrightarrow{L} U$, si se satisface cualquiera de las siguientes condiciones, que son equivalentes:

- 1) $\lim_{n \rightarrow \infty} F_n(x) = F(x)$, $\forall x$ tal que $F(x)$ sea continua en "x"
- 2) $\lim_{n \rightarrow \infty} \Phi_n(t) = \Phi(t)$, $\forall t$
- 3) $\lim_{n \rightarrow \infty} P(a < X_n \leq b) = P(a < U \leq b)$, $\forall (a; b]$

Propiedades

1) Si $\{X_n\} \xrightarrow{L} U$ y "C" es una constante, sucede que:

$$\{X_n + C\} \xrightarrow{L} U + C ; \{C \cdot X_n\} \xrightarrow{L} C \cdot U$$

2) Si $\{X_n\} \xrightarrow{L} U$ y "g" es una función continua, sucede que:

$$\{g(X_n)\} \xrightarrow{L} g(U)$$

Convergencia en probabilidad

Diremos que la sucesión $\{X_n\}$ **converge en probabilidad** a la variable "U", y escribiremos $\{X_n\} \xrightarrow{P} U$, si para todo valor positivo de ε sucede que:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P(|X_n - U| > \varepsilon) = 0$$

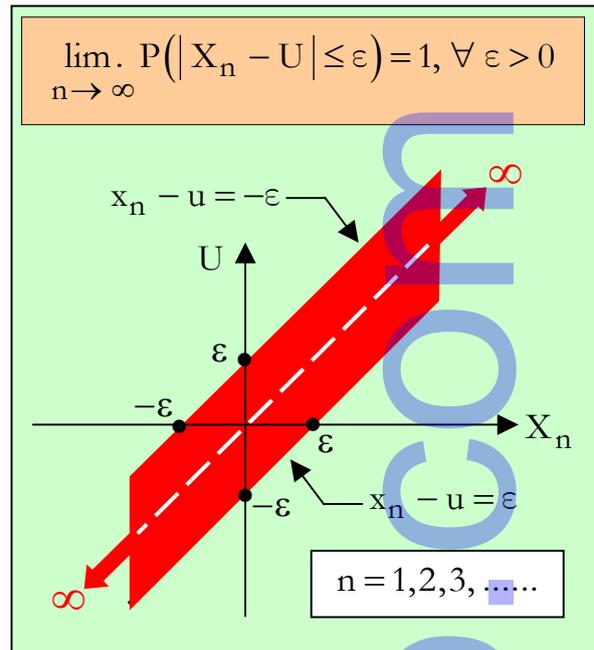
o lo que es igual, pero dando el protagonismo al suceso $|X_n - U| \leq \varepsilon$ complementario del suceso $|X_n - U| > \varepsilon$, sucede que:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P(|X_n - U| \leq \varepsilon) = 1$$

Interpretación bidimensional

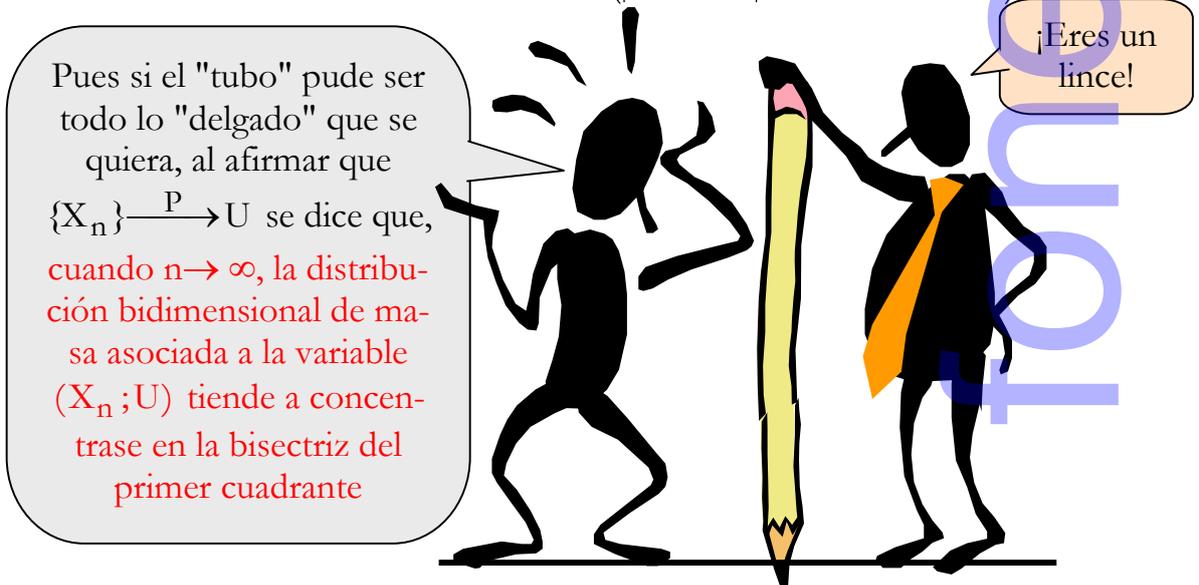
En la distribución bidimensional de masa de probabilidad correspondiente a la variable bidimensional $(X_n; U)$, la probabilidad del suceso $|X_n - U| \leq \varepsilon$ es la masa que hay en el "tubo" sombreado en la figura. El "eje" de ese "tubo" es la bisectriz del primer cuadrante, formada por los puntos que tienen iguales sus dos coordenadas; obviamente, el "tubo" es más "delgado" cuanto más próximo a 0 sea el valor elegido para $\varepsilon > 0$.

Por tanto, al afirmar que $\{X_n\} \xrightarrow{P} U$ se afirma que la sucesión $\{X_n\}$ es tal que, sea cual sea el valor elegido para $\varepsilon > 0$ (o sea, con independencia de la "delgadez" del "tubo" que elijamos), la masa que hay en el tubo, que es la probabilidad del suceso $|X_n - U| \leq \varepsilon$, se aproxima a 1 tanto como se quiera sin más que elegir "n" suficientemente grande.

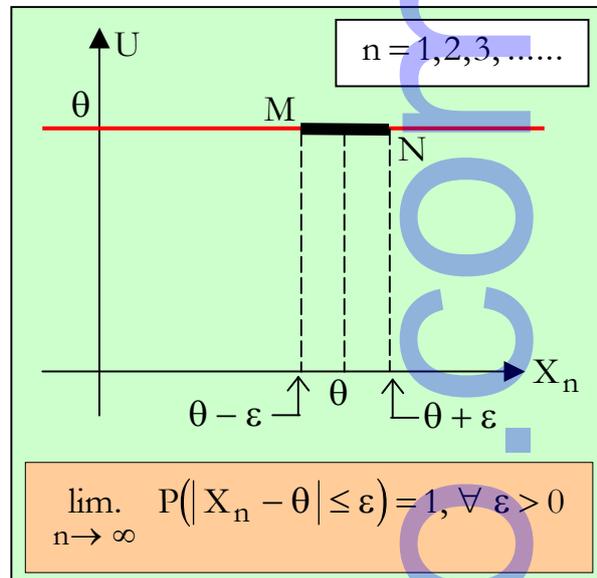
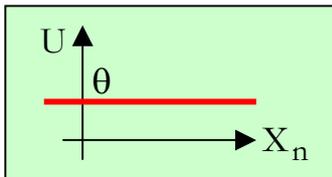


Por ejemplo:

- Si $\varepsilon = 10^{-100}$, la probabilidad del suceso $|X_n - U| \leq 10^{-100}$ se aproxima a 1 tanto como se quiera sin más que elegir "n" suficientemente grande; es decir, fijada una probabilidad α tan próxima a 0 como se quiera, hay un número natural n_0 tal que si $n \geq n_0$ ocurre que $P(|X_n - U| \leq 10^{-100}) > 1 - \alpha$.
- Si $\varepsilon = 10^{-1000000000}$, la probabilidad del suceso $|X_n - U| \leq 10^{-1000000000}$ se aproxima a 1 tanto como se quiera sin más que elegir "n" lo bastante grande; es decir, fijada una probabilidad α tan próxima a 0 como se quiera, hay un natural n_1 tal que si $n \geq n_1$ ocurre que $P(|X_n - U| \leq 10^{-1000000000}) > 1 - \alpha$.

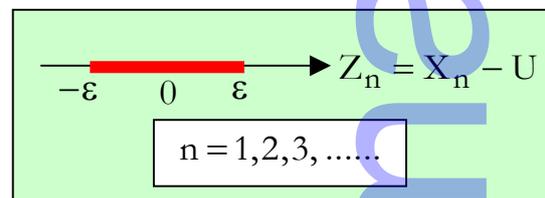


Observa: si la variable "U" toma el valor θ con probabilidad 1 (o sea, "U" es degenerada), la unidad de masa de probabilidad correspondiente a la variable aleatoria bidimensional $(X_n; U)$ está en la recta $U = \theta$; por tanto, la probabilidad del suceso $|X_n - U| \equiv |X_n - \theta| \leq \varepsilon$ es la masa que hay en el segmento de amplitud 2ε que une los puntos "M" y "N" de la figura. Así, al decir que $\{X_n\} \xrightarrow{P} \theta$ se afirma que la sucesión $\{X_n\}$ es tal que, sea cual sea el valor elegido para $\varepsilon > 0$ (o sea, con independencia de la amplitud del segmento MN que elijamos), la masa que hay en el segmento MN, que es la probabilidad del suceso $|X_n - \theta| \leq \varepsilon$, se aproxima a 1 tanto como se quiera sin más que elegir "n" bastante grande. O sea, la distribución bidimensional de masa asociada a la variable $(X_n; U)$ tiende a concentrarse en el punto $(\theta; \theta)$ de la bisectriz del primer cuadrante.

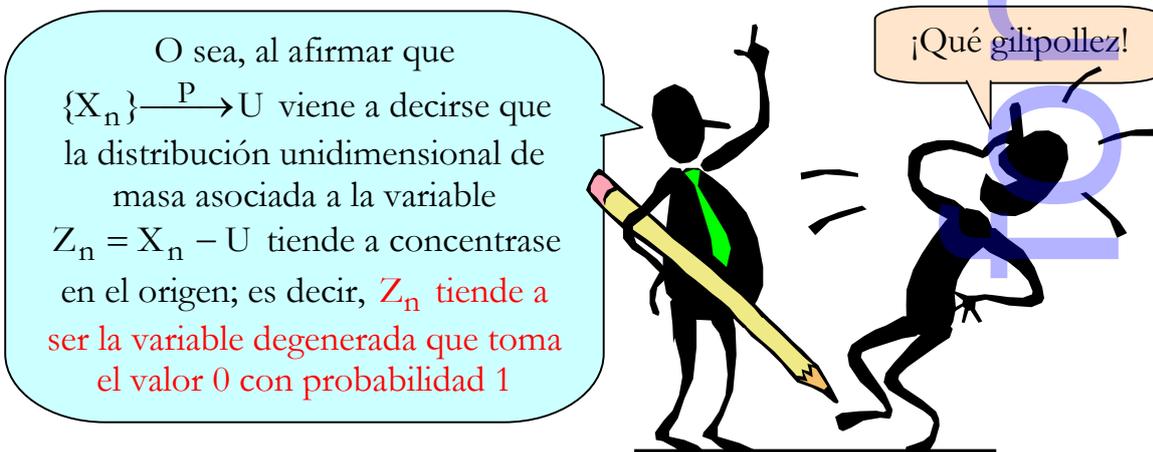


Interpretación unidimensional

En la distribución unidimensional de masa de probabilidad asociada a la variable $Z_n = X_n - U$, la probabilidad del suceso $|Z_n| \equiv |X_n - U| \leq \varepsilon$ es la masa que hay en el intervalo $[-\varepsilon; \varepsilon]$, cuya amplitud 2ε es más pequeña cuanto más próximo a 0 sea el valor elegido para $\varepsilon > 0$. Por tanto,



al afirmar que $\{X_n\} \xrightarrow{P} U$ se afirma que la sucesión $\{X_n\}$ es tal que, sea cual sea el valor elegido para $\varepsilon > 0$ (o sea, con independencia de la amplitud del intervalo $[-\varepsilon; \varepsilon]$ que elijamos), la masa que en la distribución de probabilidad de $Z_n = X_n - U$ hay en $[-\varepsilon; \varepsilon]$, que es la probabilidad del suceso $|Z_n| \leq \varepsilon$, se aproxima a 1 tanto como se quiera sin más que elegir "n" suficientemente grande.



O sea, al afirmar que $\{X_n\} \xrightarrow{P} U$ viene a decirse que la distribución unidimensional de masa asociada a la variable $Z_n = X_n - U$ tiende a concentrarse en el origen; es decir, Z_n tiende a ser la variable degenerada que toma el valor 0 con probabilidad 1

¡Qué gilipollez!

Propiedades

1) Si $\{X_n\} \xrightarrow{P} U \Leftrightarrow \{X_n - U\} \xrightarrow{P} 0$. En efecto:

\Rightarrow Si $\{X_n\} \xrightarrow{P} U$ es $\lim_{n \rightarrow \infty} P(|X_n - U| > \varepsilon) = 0, \forall \varepsilon > 0$; así:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P(|X_n - U - 0| > \varepsilon) = 0, \forall \varepsilon > 0$$

lo que demuestra que $\{X_n - U\} \xrightarrow{P} 0$.

\Leftarrow Si $\{X_n - U\} \xrightarrow{P} 0$ es $\lim_{n \rightarrow \infty} P(|X_n - U - 0| > \varepsilon) = 0, \forall \varepsilon > 0$; así:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P(|X_n - U| > \varepsilon) = 0, \forall \varepsilon > 0$$

lo que demuestra que $\{X_n\} \xrightarrow{P} U$.

2) Si $\{X_n\} \xrightarrow{P} U$ y "g" es una función continua, entonces $\{g(X_n)\} \xrightarrow{P} g(U)$

3) Estando definidas las sucesiones $\{X_n\}$ y $\{T_n\}$ sobre el mismo espacio probabilístico, si $\{X_n\} \xrightarrow{P} U$ y $\{T_n\} \xrightarrow{P} T$, entonces:

$$\{X_n + T_n\} \xrightarrow{P} U + T ; \{X_n \cdot T_n\} \xrightarrow{P} U \cdot T$$

Si la sucesión $\{X_n/T_n\}$ tiene sentido, entonces $\{X_n/T_n\} \xrightarrow{P} U/T$, siempre que $P(T = 0) \neq 0$.

4) Si todas las variables que forman la sucesión $\{X_n\}$ tienen media finita y $\lim_{n \rightarrow \infty} V(X_n) = 0$, entonces $\{X_n - E(X_n)\} \xrightarrow{P} 0$, pues $\forall \varepsilon > 0$ sucede que

$$P(|X_n - E(X_n) - 0| > \varepsilon) = P(|X_n - E(X_n)| > \varepsilon) \leq \frac{V(X_n)}{\varepsilon^2}$$

Tchebychef

$$\text{Así: } 0 \leq \lim_{n \rightarrow \infty} P(|X_n - E(X_n) - 0| > \varepsilon) \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{V(X_n)}{\varepsilon^2} = 0$$

lo que demuestra que $\{X_n - E(X_n)\} \xrightarrow{P} 0$.

5) Si todas las variables que forman la sucesión $\{X_n\}$ tienen la misma media "m" finita y $\lim_{n \rightarrow \infty} V(X_n) = 0$, entonces $\{X_n\} \xrightarrow{P} m$, pues $\forall \varepsilon > 0$ sucede que

$$P(|X_n - m| > \varepsilon) = P(|X_n - E(X_n)| > \varepsilon) \leq \frac{V(X_n)}{\varepsilon^2}$$

$E(X_n) = m$

Tchebychef

$$\text{Así: } 0 \leq \lim_{n \rightarrow \infty} P(|X_n - m| > \varepsilon) \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{V(X_n)}{\varepsilon^2} = 0$$

lo que demuestra que $\{X_n\} \xrightarrow{P} m$.

Tema 1: Sucesiones de variables aleatorias

6) Siendo "C" una constante, para que $\{X_n\} \xrightarrow{P} C$ es suficiente (no necesario) que $\lim_{n \rightarrow \infty} E(X_n) = C$ y $\lim_{n \rightarrow \infty} V(X_n) = 0$. En efecto, $\forall \varepsilon > 0$, es:

$$P(|X_n - C| > \varepsilon) = P((X_n - C)^2 > \varepsilon^2) \leq \frac{E((X_n - C)^2)}{\varepsilon^2}$$

según el teorema de Markov

VENTANA

$$E((X_n - C)^2) = E\left(\left((X_n - E(X_n)) + (E(X_n) - C)\right)^2\right) =$$

$$= E\left(\underbrace{(X_n - E(X_n))^2}_{\text{no aleatorio}} + \underbrace{(E(X_n) - C)^2}_{\text{no aleatorio}} + 2 \cdot \underbrace{(X_n - E(X_n))}_{\text{no aleatorio}} \cdot \underbrace{(E(X_n) - C)}_{\text{no aleatorio}}\right) =$$

$$= E\left((X_n - E(X_n))^2\right) + (E(X_n) - C)^2 + 2 \cdot E(X_n - E(X_n)) \cdot (E(X_n) - C) =$$

$$E\left((X_n - E(X_n))^2\right) = V(X_n)$$

$$E(X_n - E(X_n)) = E(X_n) - E(E(X_n)) = E(X_n) - E(X_n) = 0$$

$$= V(X_n) + (E(X_n) - C)^2$$

$$= \frac{V(X_n) + (E(X_n) - C)^2}{\varepsilon^2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 0 \leq \lim_{n \rightarrow \infty} P(|X_n - C| > \varepsilon) \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{V(X_n) + (E(X_n) - C)^2}{\varepsilon^2} = 0 \Rightarrow$$

$$\text{si } \lim_{n \rightarrow \infty} E(X_n) = C \text{ y } \lim_{n \rightarrow \infty} V(X_n) = 0$$

$$\Rightarrow \{X_n\} \xrightarrow{P} C$$

Convergencia en media cuadrática

Diremos que la sucesión $\{X_n\}$ **converge en media de orden "r"** a la variable "U", y escribiremos $\{X_n\} \xrightarrow{r} U$, si $\lim_{n \rightarrow \infty} E(|X_n - U|^r) = 0$.

Diremos que $\{X_n\}$ converge a "U" en **media cuadrática** en el caso $r = 2$; es decir, si $\lim_{n \rightarrow \infty} E((X_n - U)^2) = 0$, y escribiremos $\{X_n\} \xrightarrow{2} U$.

Una mierdecilla de masa **muy alejada** del punto "Pepe" produce mucha **dispersión** respecto a "Pepe": si en el origen hay una masa 0'9999999 y la masa restante, 10^{-7} , está en el punto 10^{1000} , el momento de orden 2 de esta distribución respecto al origen (que es una medida de la dispersión de la distribución respecto al origen) es brutal, nada menos que $10^{-7} \cdot 10^{2000}$.

Siendo $E((X_n - U)^2)$ el momento de orden dos de la variable $X_n - U$ respecto al origen, el valor de $E((X_n - U)^2)$ es una **medida de la dispersión** de la distribución de probabilidad de $X_n - U$ respecto al origen. Por tanto, al decir que $\{X_n\} \xrightarrow{2} U$ se dice que la medida de la dispersión de $X_n - U$ respecto al origen tiende a 0 si $n \rightarrow \infty$; o sea, la inmensa mayoría de la masa de la distribución de $X_n - U$ está muy próxima al origen y no hay masas (aunque sean irrelevantes) muy alejadas de él.

Relación entre las convergencias

- Si $\{X_n\} \xrightarrow{P} U \Rightarrow \{X_n\} \xrightarrow{L} U$.

El recíproco no es cierto, salvo si "U" es una variable degenerada (toma un único valor con probabilidad 1).

- Si $\{X_n\} \xrightarrow{2} U \Rightarrow \{X_n\} \xrightarrow{P} U$. En efecto:

$$P(|X_n - U| > \varepsilon) = P((X_n - U)^2 > \varepsilon^2) \leq \frac{E((X_n - U)^2)}{\varepsilon^2} \Rightarrow$$

según el teorema de Markov

$$\Rightarrow 0 \leq \lim_{n \rightarrow \infty} P(|X_n - U| > \varepsilon) \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{E((X_n - U)^2)}{\varepsilon^2} = 0 \Rightarrow$$

si $\lim_{n \rightarrow \infty} E((X_n - U)^2) = 0$

$$\Rightarrow \{X_n\} \xrightarrow{P} U$$



FONEMATO 1.3.1

Sea $\{X_n\}$ una sucesión de variables aleatorias independientes, todas con distribución uniforme en el intervalo $(0;a)$. Utilizando la acotación de Tchebychef, demuéstrese que $\{Z_n\} \xrightarrow{P} a$, siendo:

$$Z_n = \frac{2}{n} \cdot \sum_{i=1}^n X_i \equiv 2 \cdot (\text{Media aritmética de } X_1, X_2, \dots, X_n)$$

SOLUCIÓN

Demostraremos que $\{Z_n\} \xrightarrow{P} a$ si demostramos que $\forall \varepsilon > 0$ sucede que

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P(|Z_n - a| > \varepsilon) = 0$$

Es:

$$E(Z_n) = E\left(\frac{2}{n} \cdot \sum_{i=1}^n X_i\right) = \frac{2}{n} \cdot \sum_{i=1}^n E(X_i) = \frac{2}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{a}{2} = \frac{2}{n} \cdot n \cdot \frac{a}{2} = a$$

$X_i \approx U(0;a) \Rightarrow E(X_i) = (0+a)/2 = a/2$

$$P(|Z_n - a| > \varepsilon) = P(|Z_n - E(Z_n)| > \varepsilon) \leq \frac{V(Z_n)}{\varepsilon^2} = \frac{a^2}{3 \cdot n \cdot \varepsilon^2}$$

Tchebychef

VENTANA

pues X_1, X_2, \dots, X_n son independientes

$$V(Z_n) = V\left(\frac{2}{n} \cdot \sum_{i=1}^n X_i\right) = \frac{4}{n^2} \cdot \sum_{i=1}^n V(X_i) = \frac{4}{n^2} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{a^2}{12} = \frac{4}{n^2} \cdot n \cdot \frac{a^2}{12} = \frac{a^2}{3 \cdot n}$$

$$X_i \approx U(0;a) \Rightarrow V(X_i) = (a-0)^2/12 = a^2/12$$

Así, es $0 \leq \lim_{n \rightarrow \infty} P(|Z_n - a| > \varepsilon) \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a^2}{3 \cdot n \cdot \varepsilon^2} = 0$, lo que demuestra que:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P(|Z_n - a| > \varepsilon) = 0$$

y eso significa que la distribución unidimensional de masa de probabilidad asociada a la variable $W_n = Z_n - a$ tiende a concentrarse en el origen; es decir, W_n tiende a ser la variable degenerada que toma el valor 0 con probabilidad 1.

Latiguillo: párrafo corto o esquema que explica lo fundamental del asunto que llevamos entre manos.

FONEMATO 1.3.2

- 1) Sea $\{X_n\}$ una sucesión de variables aleatorias independientes, todas con la misma distribución de probabilidad, con media μ y varianza σ^2 , ambas finitas. Utilizando la acotación de Tchebychef, demuéstrese que $\{Z_n\} \xrightarrow{P} \mu$, siendo Z_n la media aritmética de X_1, X_2, \dots, X_n .
- 2) Razónese si la anterior demostración es cierta si sólo exigimos que las variables de la sucesión $\{X_n\}$ sean incorreladas, no necesariamente igualmente distribuidas, aunque todas con la misma media y la misma varianza finitas.

SOLUCIÓN

- 1) Sea $Z_n = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n X_i \equiv$ Media aritmética de X_1, X_2, \dots, X_n .

Demostraremos que $\{Z_n\} \xrightarrow{P} \mu$ si demostramos que $\forall \varepsilon > 0$ sucede que

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P(|Z_n - \mu| > \varepsilon) = 0$$

Es:

$$E(Z_n) = E\left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n X_i\right) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n E(X_i) = \frac{1}{n} \cdot n \cdot \mu = \mu$$

$E(X_i) = \mu, \forall i = 1, 2, \dots, n$

$$P(|Z_n - \mu| > \varepsilon) = P(|Z_n - E(Z_n)| > \varepsilon) \leq \frac{V(Z_n)}{\varepsilon^2} = \frac{\sigma^2}{n \cdot \varepsilon^2}$$

Tchebychef

pues X_1, X_2, \dots, X_n son independientes

$$V(Z_n) = V\left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n X_i\right) = \frac{1}{n^2} \cdot \sum_{i=1}^n V(X_i) = \frac{1}{n^2} \cdot \sum_{i=1}^n \sigma^2 = \frac{1}{n^2} \cdot n \cdot \sigma^2 = \frac{\sigma^2}{n}$$

VENTANA $V(X_i) = \sigma^2, \forall i = 1, 2, \dots, n$

Por tanto: $0 \leq \lim_{n \rightarrow \infty} P(|Z_n - \mu| > \varepsilon) \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sigma^2}{n \cdot \varepsilon^2} = 0$

lo que demuestra que $\lim_{n \rightarrow \infty} P(|Z_n - \mu| > \varepsilon) = 0$.

- 2) Si las variables de la sucesión $\{X_n\}$ son incorreladas, aunque no tengan la misma distribución de probabilidad, si todas tienen la misma media μ y la misma varianza σ^2 (ambas finitas), es:

$$E(Z_n) = \mu ; V(Z_n) = \sigma^2/n$$

pues X_1, X_2, \dots, X_n son incorreladas

Por tanto, sigue siendo válida la demostración hecha en 1).

Tema 1: Sucesiones de variables aleatorias

FONEMATO 1.3.3

Sea $\{X_n\}$ una sucesión de variables aleatorias independientes, todas densidad

$$f(x) = e^{-(x-\lambda)}, \quad x > \lambda$$

Demuéstrese que $\{Z_n\} \xrightarrow{P} \lambda$, siendo $Z_n = \min.\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$.

SOLUCIÓN

Demostraremos que $\{Z_n\} \xrightarrow{P} \lambda$ demostrando que $\forall \varepsilon > 0$ sucede que

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P(|Z_n - \lambda| > \varepsilon) = 0$$

En efecto:

$$\begin{aligned} & \lim_{n \rightarrow \infty} P(|Z_n - \lambda| > \varepsilon) = \\ & = \lim_{n \rightarrow \infty} (P(Z_n < \lambda - \varepsilon) + P(Z_n > \lambda + \varepsilon)) = \end{aligned}$$

$P(Z_n < \lambda - \varepsilon) = 0$, pues como X_1, X_2, \dots, X_n no toman valores inferiores a λ , entonces $Z_n = \min.\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ no toma valores inferiores a λ

$$= \lim_{n \rightarrow \infty} P(Z_n > \lambda + \varepsilon) =$$

como $Z_n = \min.\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$, será $Z_n > \lambda + \varepsilon$ sólo si $X_i > \lambda + \varepsilon, \forall i = 1, 2, \dots, n$

$$= \lim_{n \rightarrow \infty} P(X_1 > \lambda + \varepsilon; X_2 > \lambda + \varepsilon; \dots; X_n > \lambda + \varepsilon) =$$

pues X_1, X_2, \dots, X_n son independientes y todas tienen la misma distribución de probabilidad

$$\begin{aligned} & = \lim_{n \rightarrow \infty} (P(X_i > \lambda + \varepsilon))^n = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\int_{\lambda+\varepsilon}^{+\infty} e^{-(x-\lambda)} dx \right)^n = \\ & = \lim_{n \rightarrow \infty} \left((-e^{-(x-\lambda)})_{\lambda+\varepsilon}^{+\infty} \right)^n = \lim_{n \rightarrow \infty} (e^{-\varepsilon} - e^{-\infty})^n = \lim_{n \rightarrow \infty} e^{-n \cdot \varepsilon} = 0 \end{aligned}$$

¡En examen no hay que desaprovechar ninguna ocasión para acreditar que no somos del montón!



¡En examen no importa lo que sabes, importa lo que parece que sabes!



FONEMATO 1.3.4

Sea $\{X_n\}$ una sucesión de variables aleatorias, tomando X_n valores 1 y 0 con probabilidades respectivas $1/n$ y $1 - (1/n)$. Demuéstrese que $\{X_n\} \xrightarrow{P} 0$.

¿Qué ocurre con la convergencia de la funciones de distribución de las variables que forman la sucesión?

SOLUCIÓN

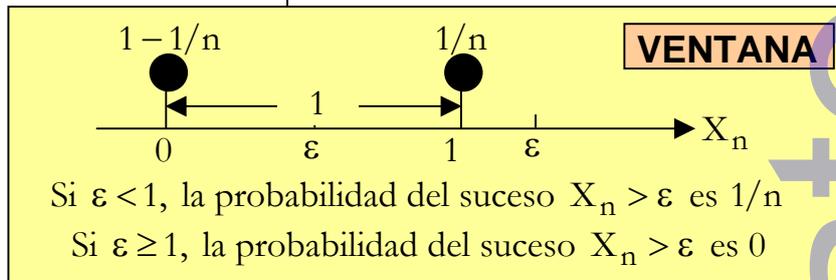
- $\{X_n\} \xrightarrow{P} 0$ si $\forall \varepsilon > 0$ sucede que $\lim_{n \rightarrow \infty} P(|X_n - 0| > \varepsilon) = 0$.

Es:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P(|X_n - 0| > \varepsilon) = \lim_{n \rightarrow \infty} (P(X_n < -\varepsilon) + P(X_n > \varepsilon)) =$$

$$P(X_n < -\varepsilon) = 0, \text{ pues } X_n \text{ no toma valores negativos}$$

$$= \lim_{n \rightarrow \infty} P(X_n > \varepsilon) = \begin{cases} \text{si } \varepsilon < 1 & = \lim_{n \rightarrow \infty} 1/n = 0 \\ \text{si } \varepsilon \geq 1 & = \lim_{n \rightarrow \infty} 0 = 0 \end{cases}$$



- De otro modo:** si "C" es una constante, para que $\{X_n\} \xrightarrow{P} C$ es suficiente (no necesario) que $\lim_{n \rightarrow \infty} E(X_n) = C$ y $\lim_{n \rightarrow \infty} V(X_n) = 0$.

En nuestro caso $C = 0$, siendo:

$$E(X_n) = 0 \cdot P(X_n = 0) + 1 \cdot P(X_n = 1) = 1/n$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} E(X_n) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} = 0 ; \quad \lim_{n \rightarrow \infty} V(X_n) = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{n^2} \right) = 0$$

$$V(X_n) = E(X_n^2) - (E(X_n))^2 = (0^2 \cdot P(X_n = 0) + 1^2 \cdot P(X_n = 1)) - (1/n)^2 = (1/n) - (1/n)^2$$

- Función de distribución de X_n : $F_n(x) = P(X_n \leq x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < 0 \\ 1 - 1/n & \text{si } 0 \leq x < 1 \\ 1 & \text{si } x \geq 1 \end{cases}$

$$\text{Por tanto: } \lim_{n \rightarrow \infty} F_n(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} \begin{cases} 0 & \text{si } x < 0 \\ 1 - 1/n & \text{si } 0 \leq x < 1 \\ 1 & \text{si } x \geq 1 \end{cases} = \begin{cases} 0 & \text{si } x < 0 \\ 1 & \text{si } 0 \leq x < 1 \\ 1 & \text{si } x \geq 1 \end{cases}$$

que es la función de distribución de una variable degenerada que concentra toda la masa de probabilidad en el punto $x = 0$.

FONEMATO 1.3.5

Sea $\{X_n\}$ una sucesión de variables aleatorias, tomando X_n valores "a" y $a + n \cdot b$ ($b \neq 0$) con probabilidades respectivas $1 - (1/n)$ y $1/n$.

1) Demuéstrase que $\{X_n\} \xrightarrow{P} a$.

2) Estúdiase si $\{X_n\} \xrightarrow{2} a$.

SOLUCIÓN

1) Demostraremos que $\{X_n\} \xrightarrow{P} a$ si demostramos que $\forall \varepsilon > 0$ sucede que

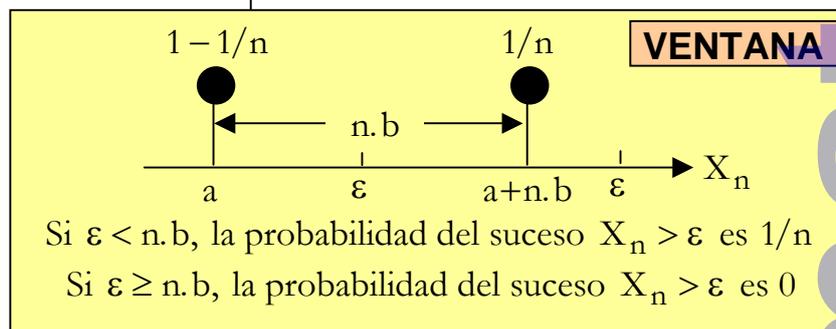
$$\lim_{n \rightarrow \infty} P(|X_n - a| > \varepsilon) = 0$$

Es:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P(|X_n - a| > \varepsilon) = \lim_{n \rightarrow \infty} (P(X_n < a - \varepsilon) + P(X_n > a + \varepsilon)) =$$

$P(X_n < a - \varepsilon) = 0$, pues la variable X_n no toma valores menores que "a"

$$= \lim_{n \rightarrow \infty} P(X_n > \varepsilon) = \begin{cases} \text{si } \varepsilon < n \cdot b & = \lim_{n \rightarrow \infty} 1/n = 0 \\ \text{si } \varepsilon \geq n \cdot b & = \lim_{n \rightarrow \infty} 0 = 0 \end{cases}$$



Observa: sabemos que si "a" es una constante, para que $\{X_n\} \xrightarrow{P} a$ es **suficiente** que:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} E(X_n) = a ; \quad \lim_{n \rightarrow \infty} V(X_n) = 0$$

La sucesión dada $\{X_n\}$ demuestra que las anteriores condiciones **no son necesarias**, pues $\{X_n\} \xrightarrow{P} a$ y sin embargo $\lim_{n \rightarrow \infty} E(X_n) \neq a$:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} E(X_n) = \lim_{n \rightarrow \infty} (a + b) = a + b \neq a$$

$$E(X_n) = a \cdot P(X_n = a) + (a + n \cdot b) \cdot P(X_n = a + n \cdot b) = a \cdot (1 - \frac{1}{n}) + (a + n \cdot b) \cdot \frac{1}{n} = a + b$$

$$2) \{X_n\} \xrightarrow{2} a \text{ si } \lim_{n \rightarrow \infty} E((X_n - a)^2) = 0.$$

Es:

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} E((X_n - a)^2) &= \lim_{n \rightarrow \infty} E(X_n^2 - 2.a.X_n + a^2) = \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} (E(X_n^2) - 2.a.E(X_n) + a^2) = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &* E(X_n) = a + b \\ &* E(X_n^2) = a^2.P(X_n = a) + (a + n.b)^2.P(X_n = a + n.b) = \\ &= a^2.(1 - \frac{1}{n}) + (a + n.b)^2.\frac{1}{n} = a^2 + 2.a.b + n.b^2 \end{aligned}$$

$$= \lim_{n \rightarrow \infty} (a^2 + 2.a.b + n.b^2 - 2.a.(a + b) + a^2) = \lim_{n \rightarrow \infty} n.b^2 = \infty$$

Por tanto, la sucesión $\{X_n\}$ no converge a "a" en media cuadrática.

El asunto de la convergencia en probabilidad y en media cuadrática tendrá protagonismo estelar cuando hablemos de la **consistencia** de los estadísticos



Acostúmbrate a usar **ventanas**, pues facilitan mucho la lectura de lo escrito, por lo que tu profe te lo agradecerá con su **cariño y simpatía**



Pedrusco "K" = Pedrusco "T"

VENTANA

Razonamientos o cálculos que permiten **pasar** de un lado a otro del "=" o de "⇒"

Pedrusco "K" ⇒ Pedrusco "T"

FONEMATO 1.3.6

Siendo $Z \approx U(-1;1)$, sea $\{X_n\}$ una sucesión de variables aleatorias tales que

$$X_n = \begin{cases} -1 & \text{si } -1 < Z < -1/n \\ 0 & \text{si } -1/n < Z < 1/n \\ 1 & \text{si } 1/n < Z < 1 \end{cases}$$

1) Calcúlese la función de distribución de X_n . A partir de ella, demuestre que la sucesión dada converge en ley a cualquier variable aleatoria que tome los valores -1 y 1 de modo equiprobable.

2) Sea "W" la variable aleatoria tal que $W = \begin{cases} -1 & \text{si } -1 < Z < 0 \\ 1 & \text{si } 0 < Z < 1 \end{cases}$

Pruébese que $\{X_n\} \xrightarrow{L} W$ y que $\{X_n\} \xrightarrow{2} W$.

SOLUCIÓN

1) Siendo $Z \approx U(-1;1)$, su función de densidad es

$$f(z) = 1/2, \quad -1 < z < 1$$

Por tanto:

$$P(X_n = -1) = P(-1 < Z < -1/n) = \int_{-1}^{-1/n} f(z).dz = \dots = (n-1)/2.n$$

$$P(X_n = 0) = P(-1/n < Z < 1/n) = \int_{-1/n}^{1/n} f(z).dz = \dots = 1/n$$

$$P(X_n = 1) = P(1/n < Z < 1) = \int_{1/n}^1 f(z).dz = \dots = (n-1)/2.n$$

Así, la función de cuantía de la variable X_n es:

x	-1	0	1
$P(X_n = x)$	$(n-1)/2.n$	$1/n$	$(n-1)/2.n$

La función de distribución de X_n es:

$$F_n(x) = P(X_n \leq x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < -1 \\ (n-1)/2.n & \text{si } -1 \leq x < 0 \\ (n+1)/2.n & \text{si } 0 \leq x < 1 \\ 1 & \text{si } x \geq 1 \end{cases}$$

Es:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} F_n(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} \begin{cases} 0 & \text{si } x < -1 \\ (n-1)/2.n & \text{si } -1 \leq x < 0 \\ (n+1)/2.n & \text{si } 0 \leq x < 1 \\ 1 & \text{si } x \geq 1 \end{cases} = \begin{cases} 0 & \text{si } x < -1 \\ 1/2 & \text{si } -1 \leq x < 0 \\ 1/2 & \text{si } 0 \leq x < 1 \\ 1 & \text{si } x \geq 1 \end{cases}$$

que es la función de distribución de una variable aleatoria que toma los valores -1 y 1 de modo equiprobable.

2) Para probar que $\{X_n\} \xrightarrow{L} W$ basta probar que "W" es una variable que toma los valores -1 y 1 de modo equiprobable. Es:

$$P(W = -1) = P(-1 < Z < 0) = \int_{-1}^0 f(z).dz = \dots = 1/2$$

$$P(W = 1) = P(0 < Z < 1) = \int_0^1 f(z).dz = \dots = 1/2$$

• Probaremos que $\{X_n\} \xrightarrow{2} W$ probando que $\lim_{n \rightarrow \infty} E((X_n - W)^2) = 0$.

Es:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} E((X_n - W)^2) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} = 0$$

VENTANA

$$E((X_n - W)^2) = (-1 - (-1))^2 \cdot P(X_n = -1; W = -1) +$$

W / X _n	-1	0	1
-1	"W" y X _n no son independientes, pues ambas están determinadas por el valor de "Z"		
1			

$$\begin{aligned} &+ (-1 - 1)^2 \cdot P(X_n = -1; W = 1) + (0 - (-1))^2 \cdot P(X_n = 0; W = -1) + \\ &+ (0 - 1)^2 \cdot P(X_n = 0; W = 1) + (1 - (-1))^2 \cdot P(X_n = 1; W = -1) + \\ &+ (1 - 1)^2 \cdot P(X_n = 1; W = 1) = \\ &= 4 \cdot P(X_n = -1; W = 1) + P(X_n = 0; W = -1) + \\ &+ P(X_n = 0; W = 1) + 4 \cdot P(X_n = 1; W = -1) = \\ &= 4 \cdot P(-1 < Z < -1/n; 0 < Z < 1) + P(-1/n < Z < 1/n; -1 < Z < 0) + \\ &+ P(-1/n < Z < 1/n; 0 < Z < 1) + 4 \cdot P(1/n < Z < 1; -1 < Z < 0) = \end{aligned}$$

el primer sumando es 0, pues los sucesos $-1 < Z < -1/n$ y $0 < Z < 1$ son incompatibles; el cuarto sumando es 0, pues los sucesos $1/n < Z < 1$ y $-1 < Z < 0$ son incompatibles

$$= P(-1/n < Z < 1/n; -1 < Z < 0) + P(-1/n < Z < 1/n; 0 < Z < 1) =$$

la intersección de los sucesos $-1/n < Z < 1/n$ y $-1 < Z < 0$ es el suceso $-1/n < Z < 0$; la intersección de los sucesos $-1/n < Z < 1/n$ y $0 < Z < 1$ es el suceso $0 < Z < 1/n$

$$\begin{aligned} &= P(-1/n < Z < 0) + P(0 < Z < 1/n) = \\ &= \int_{-1/n}^0 \frac{1}{2}.dz + \int_0^{1/n} \frac{1}{2}.dz = \dots = \frac{1}{n} \end{aligned}$$

FONEMATO 1.3.7

Sea $\{X_n\}$ una sucesión de variables aleatorias, tomando X_n valores 0 y n^2 con probabilidades respectivas $1 - 1/n$ y $1/n$. Demuéstrese que $\{X_n\} \xrightarrow{P} 0$.

SOLUCIÓN

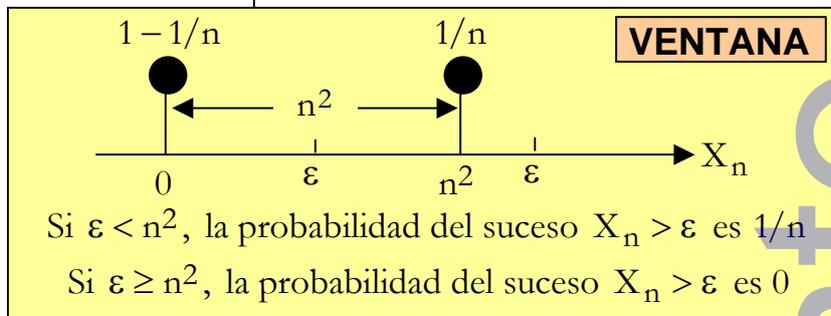
Demostraremos que $\{X_n\} \xrightarrow{P} 0$ si demostramos que $\forall \varepsilon > 0$ sucede que

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P(|X_n - 0| > \varepsilon) = 0$$

Es:
$$\lim_{n \rightarrow \infty} P(|X_n - 0| > \varepsilon) = \lim_{n \rightarrow \infty} (P(X_n < -\varepsilon) + P(X_n > \varepsilon)) =$$

$P(X_n < -\varepsilon) = 0$, pues X_n no toma valores negativos

$$= \lim_{n \rightarrow \infty} P(X_n > \varepsilon) = \begin{cases} \text{si } \varepsilon < n^2 & = \lim_{n \rightarrow \infty} 1/n = 0 \\ \text{si } \varepsilon \geq n^2 & = \lim_{n \rightarrow \infty} 0 = 0 \end{cases}$$

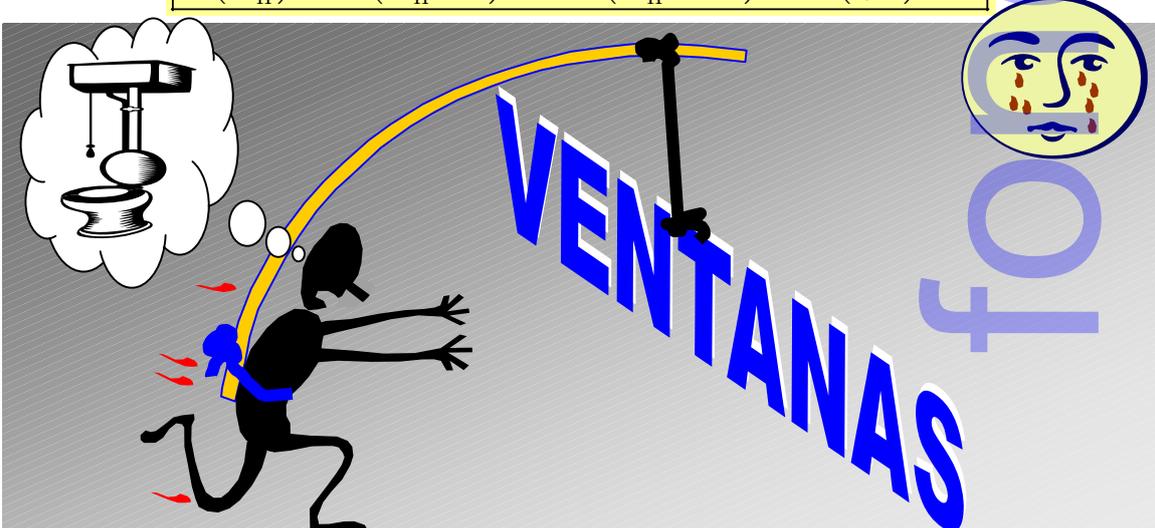


Observa: sabemos que si "C" es una constante, para que $\{X_n\} \xrightarrow{P} C$ es **suficiente** que $\lim_{n \rightarrow \infty} E(X_n) = C$ y $\lim_{n \rightarrow \infty} V(X_n) = 0$.

La sucesión dada $\{X_n\}$ demuestra que las anteriores dos condiciones **no son necesarias**, pues $\{X_n\} \xrightarrow{P} 0$ y sin embargo $\lim_{n \rightarrow \infty} E(X_n) \neq 0$:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} E(X_n) = \lim_{n \rightarrow \infty} n = +\infty \neq 0$$

$E(X_n) = 0 \cdot P(X_n = 0) + n^2 \cdot P(X_n = n^2) = n^2 \cdot (1/n) = n$



1.4 TEOREMA DE BERNOUILLI

La frecuencia relativa de un suceso converge en probabilidad a la probabilidad del suceso.

En efecto, llamando **éxito** al suceso de que como resultado del experimento ocurra el suceso "A", si $P(A) = p$, la variable T_n que expresa el número de "éxitos" al repetir el experimento "n" veces tiene distribución $B(n;p)$, y la variable $Z_n = T_n/n$ expresa la **frecuencia relativa** del suceso "A" al repetir el experimento "n" veces. Así, siendo $\varepsilon > 0$, es:

$$T_n \approx B(n;p) \Rightarrow E(T_n) = n \cdot p \Rightarrow E(Z_n) = E(T_n/n) = E(T_n)/n = p$$

$$P(|Z_n - p| > \varepsilon) = P(|Z_n - E(Z_n)| > \varepsilon) \leq \frac{V(Z_n)}{\varepsilon^2} = \frac{p \cdot (1-p)}{n \cdot \varepsilon^2}$$

Tchebychef

$$T_n \approx B(n;p) \Rightarrow V(T_n) = n \cdot p \cdot (1-p) \Rightarrow \\ \Rightarrow V(Z_n) = V(T_n/n) = V(T_n)/n^2 = p \cdot (1-p)/n$$

Por tanto:
$$0 \leq \lim_{n \rightarrow \infty} P(|Z_n - p| > \varepsilon) \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{p \cdot (1-p)}{n \cdot \varepsilon^2} = 0$$

lo que demuestra que $\{Z_n\} \xrightarrow{P} p$.

Utilidad del teorema de Bernouilli

En un experimento aleatorio, siendo "A" un suceso tal que $P(A) = p$, queremos determinar el número "n" de veces que debe repetirse el experimento para que no sea superior a α la probabilidad de que la frecuencia relativa del suceso "A" se diferencie de "p" en un cantidad superior a ε ; es decir, **buscamos "n" tal que** $P(|Z_n - p| > \varepsilon) \leq \alpha$. Obviamente, como $P(|Z_n - p| > \varepsilon) \leq p \cdot (1-p)/(n \cdot \varepsilon^2)$, será

$$P(|Z_n - p| > \varepsilon) \leq p \cdot (1-p)/(n \cdot \varepsilon^2) \leq \alpha$$

siempre que $n \geq p \cdot (1-p)/\alpha \cdot \varepsilon^2$. **Por ejemplo**, si $p = 0'2$, $\varepsilon = 0'1$ y $\alpha = 0'01$, será $P(|Z_n - 0'2| > 0'1) \leq 0'01$ siempre que $n \geq 0'2 \cdot (1 - 0'2)/(0'01 \cdot 0'1^2) = 1600$.

Si desconocemos el valor de "p", acotamos el producto $p \cdot (1-p)$ con la menor de sus cotas superiores, que es $1/4$; por tanto, será $P(|Z_n - p| > \varepsilon) \leq \alpha$ siempre que $n \geq 1/(4 \cdot \alpha \cdot \varepsilon^2) \geq p \cdot (1-p)/(\alpha \cdot \varepsilon^2)$.

Por ejemplo, si $\varepsilon = 0'1$ y $\alpha = 0'01$, será

$$P(|Z_n - p| > 0'1) \leq 0'01$$

si $n \geq 1/(4 \cdot 0'01 \cdot 0'1^2) \geq p \cdot (1-p)/(0'01 \cdot 0'1^2)$, es decir, si $n \geq 2500$.

Si $g(p) = p \cdot (1-p) \Rightarrow g'(p) = 1 - 2 \cdot p$ es nula si $p = 1/2$, y como $g''(1/2) = -2 < 0$, el valor de $g(p) = p \cdot (1-p)$ es máximo si $p = 1/2$, siendo $g(1/2) = 1/4$.

FONEMATO 1.4.1

Determinése el número "n" de veces que debe lanzarse una moneda para que no sea inferior a 0'8 la probabilidad de que la frecuencia relativa del suceso "cara" esté comprendida entre 0'45 y 0'55. ¿Cuántas veces debe lanzarse la moneda para que no sea inferior a 0'9 la probabilidad de que la frecuencia relativa del suceso "cara" esté comprendida entre 0'49 y 0'51?

SOLUCIÓN

- Llamando "éxito" al suceso "obtener cara", si $P(\text{éxito}) = 0'5$, la variable X_i que expresa el número de "éxitos" (0 ó 1) en el i-ésimo lanzamiento tiene distribución de Bernoulli de parámetro 0'5, y la variable $T_n = X_1 + \dots + X_n$ que expresa el número de "éxitos" en "n" lanzamientos tiene distribución $B(n; 0'5)$, supuesto que X_1, \dots, X_n son independientes.

Obviamente, la variable $Z_n = T_n/n$ expresa la frecuencia relativa del suceso "cara" en "n" lanzamientos de la moneda, y se nos pide que determinemos "n" de modo que $P(0'45 < Z_n < 0'55) \geq 0'8$; es:

$$P(0'45 < Z_n < 0'55) = P(|Z_n - 0'5| < 0'05) =$$

$$T_n \approx B(n; 0'5) \Rightarrow E(T_n) = 0'5 \cdot n \Rightarrow E(Z_n) = E(T_n/n) = E(T_n)/n = 0'5$$

$$= P(|Z_n - E(Z_n)| < 0'05) \geq 1 - \frac{V(Z_n)}{0'05^2} = 1 - \frac{0'5^2/n}{0'05^2} \geq 0'8 \Rightarrow$$

Tchebychef

$$T_n \approx B(n; 0'5) \Rightarrow V(T_n) = 0'5^2 \cdot n \Rightarrow V(Z_n) = V(T_n/n) = V(T_n)/n^2 = 0'5^2/n$$

$$\Rightarrow \frac{0'5^2/n}{0'05^2} \leq 0'2 \Rightarrow n \geq \frac{0'5^2}{0'05^2 \cdot 0'2} = 500$$

- Determinemos "n" de modo que $P(0'49 < Z_n < 0'51) \geq 0'9$:

$$P(0'49 < Z_n < 0'51) = P(|Z_n - 0'5| < 0'01) =$$

$$= P(|Z_n - E(Z_n)| < 0'01) \geq 1 - \frac{V(Z_n)}{0'01^2} = 1 - \frac{0'5^2/n}{0'01^2} \geq 0'9 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{0'5^2/n}{0'01^2} \leq 0'1 \Rightarrow n \geq \frac{0'5^2}{0'01^2 \cdot 0'1} = 2500$$

Aunque es **menos elegante**, puedes aplicar la **receta del teorema de Bernoulli**: si Z_n expresa la frecuencia relativa del suceso "éxito" en "n" experimentos de Bernoulli independientes y todos con probabilidad "p" de "éxito" **conocida**, es $P(|Z_n - p| > \varepsilon) \leq p \cdot (1 - p) / n \cdot \varepsilon^2$.

Así, es $P(|Z_n - p| > \varepsilon) \leq p \cdot (1 - p) / n \cdot \varepsilon^2 \leq \alpha$ si $n \geq p \cdot (1 - p) / \alpha \cdot \varepsilon^2$.

En nuestro caso es $p = 0'5$, $\varepsilon = 0'05$ y $\alpha = 1 - 0'8 = 0'2$.

FONEMATO 1.4.2

La probabilidad de tránsitos en un aeropuerto se desconoce. Para estudiar la rentabilidad de una instalación hotelera en el aeropuerto, se estima dicha probabilidad mediante la frecuencia relativa de tránsitos respecto al total de viajeros del aeropuerto. Determinése el número "n" de pasajeros que deben observarse si se quiere que no sea mayor que 0'05 la probabilidad de que la desviación entre la frecuencia relativa de tránsitos y la probabilidad desconocida sea superior a 0'06.

SOLUCIÓN

Llamando "éxito" al suceso de que un pasajero esté en tránsito, si $P(\text{éxito}) = p$, la variable X_i que expresa el número de "éxitos" (0 ó 1) con el i-ésimo pasajero tiene distribución de Bernouilli de parámetro "p", y la variable $T_n = X_1 + \dots + X_n$ que expresa el número de "éxitos" entre "n" pasajeros tiene distribución $B(n; p)$, supuesto que X_1, \dots, X_n son independientes.

Obviamente, la variable $Z_n = T_n/n$ expresa la frecuencia relativa de pasajeros en tránsito entre "n" pasajeros, y se nos pide que determinemos "n" de modo que

$$P(|Z_n - p| > 0'06) \leq 0'05$$

Es:

$$\begin{aligned} T_n \approx B(n; p) &\Rightarrow E(T_n) = n \cdot p \Rightarrow E(Z_n) = E(T_n/n) = E(T_n)/n = p \\ P(|Z_n - p| > 0'06) &= P(|Z_n - E(Z_n)| > 0'06) \leq \frac{V(Z_n)}{0'06^2} = \\ &\xrightarrow{\text{Tchebychef}} \frac{V(T_n/n)}{0'06^2} = \frac{V(T_n)}{n^2 \cdot 0'06^2} = \frac{p \cdot (1-p)}{n \cdot 0'06^2} \\ T_n \approx B(n; p) &\Rightarrow V(T_n) = n \cdot p \cdot (1-p) \Rightarrow \\ \Rightarrow V(Z_n) &= V(T_n/n) = V(T_n)/n^2 = p \cdot (1-p)/n \\ \Rightarrow \frac{p \cdot (1-p)/n}{0'06^2} &\leq 0'05 \Rightarrow n \geq \frac{p \cdot (1-p)}{0'06^2 \cdot 0'05} \\ \text{como desconocemos "p", no hay más remedio que acotar} & \\ \text{el producto } p \cdot (1-p) \text{ mediante la menor de sus cotas superiores,} & \\ \text{que es } 1/4, \text{ pues } \forall p \in (0; 1) \text{ es } p \cdot (1-p) \leq 1/4 & \quad \text{VENTANA} \\ \Rightarrow n \geq \frac{1/4}{0'06^2 \cdot 0'05} \geq \frac{p \cdot (1-p)}{0'06^2 \cdot 0'05} &\Rightarrow n \geq 1389 \geq \frac{p \cdot (1-p)}{0'06^2 \cdot 0'05} \end{aligned}$$

Aunque es **menos elegante**, puedes aplicar la **receta del teorema de Bernouilli**: si Z_n expresa la frecuencia relativa del suceso "éxito" en "n" experimentos de Bernouilli independientes y todos con probabilidad "p" de "éxito" **desconocida**, es $P(|Z_n - p| > \varepsilon) \leq p \cdot (1-p)/n \cdot \varepsilon^2$.

Así, como $p \cdot (1-p) \leq 1/4$, es:

$$P(|Z_n - p| > \varepsilon) \leq p \cdot (1-p)/n \cdot \varepsilon^2 \leq 1/(4 \cdot n \cdot \varepsilon^2) \leq \alpha \text{ si } n \geq 1/(4 \cdot \alpha \cdot \varepsilon^2)$$

En nuestro caso es $\varepsilon = 0'06$ y $\alpha = 0'05$.

1.5 TEOREMA CENTRAL DEL LÍMITE

Se dice que la sucesión de variables aleatorias $\{X_n\}$ verifica el teorema Central del Límite si la correspondiente sucesión de variables tipificadas converge en ley a la variable $N(0;1)$, o lo que es igual, la sucesión $\{X_n\}$ converge en ley a la normal con media y varianza las de X_n .



EL PROFESOR QUE CORRIGE EL EXAMEN

Todos los profesores son de la misma opinión: corregir exámenes no gusta a nadie, no es trabajo agradable enfrentarse por n-ésima vez a la tarea de leer y puntuar un montón de folios escritos por principiantes que en la mayoría de los casos no tienen ni idea y sólo escriben barbaridades y estupideces sobre el asunto de sota, caballo y rey que por j-ésima vez cae en examen. Por eso, **cuando un profe se sienta a corregir exámenes no suele estar de buen humor.**

Así las cosas, lo que escribamos o dibujemos en examen debe **diferenciarnos positivamente** de los demás, y para conseguir tal diferenciación y que **al profe se le caigan los pantalones**, basta **escribir o dibujar pensando que no se lo sabe y por tanto hay que llevarle de la mano**, explicándole todos los aspectos más relevantes de las **conexiones neuronales** que establezcamos en cada caso.



1.6 TEOREMA DE LINDEBERG-LEVY

Sea $\{X_n\}$ una sucesión de variables aleatorias independientes, todas con la misma distribución de probabilidad, con la misma media μ y la misma varianza σ^2 (ambas finitas). Sea $\{S_n\}$ la sucesión de variables aleatorias tales que

$$S_1 = X_1 ; S_2 = X_1 + X_2 ; \dots ; S_n = X_1 + X_2 + \dots + X_n ; \dots$$

- Lindeberg-Levy demostraron que la sucesión $\{S_n\}$ verifica el teorema Central del Límite; es decir: $\{(S_n - E(S_n))/\sqrt{V(S_n)}\} \xrightarrow{L} N(0;1)$, o lo que es igual:

$$\{S_n\} \xrightarrow{L} N(E(S_n); \sqrt{V(S_n)})$$

Esto significa que cuando "n" es grande (≥ 30), la distribución de probabilidad de la variable $S_n = X_1 + X_2 + \dots + X_n$ puede aproximarse mediante la normal con media y varianza las de S_n , que son:

$$E(S_n) = E\left(\sum_{i=1}^n X_i\right) = n \cdot \mu ; V(S_n) = V\left(\sum_{i=1}^n X_i\right) = n \cdot \sigma^2$$

$$E(X_i) = \mu, \forall i = 1, 2, \dots, n$$

$$V(X_i) = \sigma^2, \forall i = 1, 2, \dots, n$$

Por tanto, si "n" es grande (≥ 30), la distribución de probabilidad de la variable $S_n = X_1 + X_2 + \dots + X_n$ puede aproximarse mediante la $N(n \cdot \mu; \sigma \cdot \sqrt{n})$.

- También verifica el teorema Central del Límite la sucesión $\{\bar{X}_n\}$, siendo

$$\bar{X}_n = (X_1 + X_2 + \dots + X_n)/n \equiv \text{Media aritmética de } X_1, \dots, X_n$$

o sea:

$$\{\bar{X}_n\} \xrightarrow{L} N(E(\bar{X}_n); \sqrt{V(\bar{X}_n)}) = N(\mu; \sigma/\sqrt{n})$$

$$E(\bar{X}_n) = E\left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n X_i\right) = \mu ; V(\bar{X}_n) = V\left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n X_i\right) = \frac{\sigma^2}{n}$$

$$E(X_i) = \mu, \forall i = 1, 2, \dots, n$$

$$V(X_i) = \sigma^2, \forall i = 1, 2, \dots, n$$

El que así sean las cosas es estupendo, pues a partir de ahora serán incontables las veces que trabajaremos con la suma o la media aritmética de un elevado número de variables aleatorias independientes, todas con igual distribución de probabilidad, la misma media y la misma varianza.



FONEMATO 1.6.1

El número de muertos cada minuto a causa del hambre en una región alejada de nuestro idílico primer mundo tiene distribución de Poisson de parámetro 40, con independencia unos minutos de otros. Calcúlese la probabilidad de que durante el día de Nochebuena mueran de hambre no menos de 28800 personas en esa región. ¿Qué cota de muertos se superará ese día con probabilidad 0'95?

SOLUCIÓN

Si $X_i \approx P(40)$ expresa el número muertos durante el i -ésimo minuto del día de Nochebuena, la variable $X = X_1 + \dots + X_{1440}$ expresa el número de muertos en los 1440 minutos de ese día, y $X = X_1 + \dots + X_{1440} \approx P(57600)$, pues si las variables independientes X_1, \dots, X_k tienen distribución de Poisson de parámetros respectivos $\lambda_1, \dots, \lambda_k$, la suma de ellas tiene distribución de Poisson de parámetro $\lambda_1 + \dots + \lambda_k$. La función de probabilidad de $X \approx P(57600)$ es:

$$P(X = x) = e^{-57600} \cdot 57600^x / x!, \quad x = 0, 1, 2, \dots$$

Así, la probabilidad de que el día de Nochebuena mueran de hambre no menos de 28800 personas en esa región, es:

$$P(X \geq 28800) = 1 - P(X \leq 28799) = 1 - \sum_{x=0}^{28799} \frac{e^{-57600} \cdot 57600^x}{x!}$$

Naturalmente, **se nos le hiela la sangre** al pensar en calcular tan espantosa suma, por ello estamos enormemente agradecidos a Lindeberg-Levy y recitamos con entusiasmo su dulce **latiguillo: como "X" es suma de un elevado número de variables aleatorias independientes, todas con la misma distribución de probabilidad, con la misma media y la misma varianza, podemos aproximar la distribución de probabilidad de "X" mediante la normal con media y varianza las de "X"**, que son $E(X) = 57600$ y $V(X) = 57600$ (si $X \approx P(\theta)$ es $E(X) = V(X) = \theta$). Así:

$$P(X \geq 28800) \cong P\left(N(57600; \sqrt{57600}) \geq \underbrace{28799'5}_{\uparrow}\right) = \dots$$

VENTANA

CORRECCIÓN POR CONTINUIDAD

Al aproximar la distribución discreta $X \approx P(57600)$ mediante la $N(57600; \sqrt{57600})$, consideramos que la "masa puntual" que tiene $X \approx P(57600)$ en el punto 28800 se corresponde con la "masa continua" que tiene la $N(57600; \sqrt{57600})$ en el intervalo $(28799'5; 28800'5)$.

Como la probabilidad del suceso $X = 28800$ debe sumarse, al trabajar con la normal consideramos la masa de probabilidad que hay a la derecha del punto 28799'5.

- Hay que determinar "c" de modo que $P(X \geq c) = 0'95$:

$$\begin{aligned} P(X \geq c) &\cong P\left(N(57600; \sqrt{57600}) \geq c - 0'5\right) = \\ &= P\left(N(0; 1) \geq \frac{c - 0'5 - 57600}{\sqrt{57600}}\right) = 0'95 \Rightarrow \frac{c - 0'5 - 57600}{\sqrt{57600}} = -1'645 \end{aligned}$$

FONEMATO 1.6.2

Con independencia unos días de otros, la aleatoria demanda diaria de vino (en litros) en un bar tiene distribución uniforme en el intervalo $(20;40)$. Calcúlese la probabilidad de que en 182 días se vendan más de 6370 litros de vino.

SOLUCIÓN

Si $X_i \approx U(20;40)$ expresa la aleatoria demanda de vino el i -ésimo día, la variable $X = X_1 + X_2 + \dots + X_{182}$ expresa la aleatoria venta total durante 182 días.

Se nos pide la probabilidad del suceso $X > 6370$, lo que es bastante **imposible** si se desconoce la distribución de probabilidad de "X"... y `por eso firmamos con gusto para que a Lindeberg-Levy les hagan un monumento precioso en su pueblo y colgamos en Facebook su lindo **latiguillo: como "X" es suma de un elevado número de variables aleatorias independientes, todas con la misma distribución de probabilidad, con la misma media** ($E(X_i) = (20 + 40)/2 = 30$) **y la misma varianza** ($V(X_i) = (40 - 20)^2/12 = 100/3$), **podemos aproximar la distribución de probabilidad de "X" mediante la normal con media y varianza las de "X"**, que son:

$$E(X) = E\left(\sum_{i=1}^{182} X_i\right) = \sum_{i=1}^{182} E(X_i) = 182 \cdot E(X_i) = 5460$$

$$V(X) = V\left(\sum_{i=1}^{182} X_i\right) = \sum_{i=1}^{182} V(X_i) = 182 \cdot V(X_i) = 18200/3$$

Así:

$$\begin{aligned} P(X > 6370) &\cong P\left(N(5460; \sqrt{18200/3}) > 6370\right) = \\ &= P\left(N(0;1) > \frac{6370 - 5460}{\sqrt{18200/3}}\right) = \dots \end{aligned}$$



FONEMATO 1.6.3

Al lanzar un dado 500 veces ganamos 100 \$ por punto si sale cara par, y perdemos 100 \$ por punto si sale cara impar. Calcúlese la probabilidad de ganar menos de 23000 \$.

SOLUCIÓN

La función de probabilidad o cuantía de la variable X_i que expresa el resultado del i -ésimo lanzamiento del dado es:

x	1	2	3	4	5	6
$P(X_i = x)$	1/6	1/6	1/6	1/6	1/6	1/6

Si ganamos 100 \$ por punto si sale cara par y perdemos 100 \$ por punto si sale cara impar, siendo Z_i la variable que expresa el aleatorio beneficio obtenido en el i -ésimo lanzamiento, es claro que

X_i	1	2	3	4	5	6
	↓	↓	↓	↓	↓	↓
Z_i	-100	200	-300	400	-500	600

Por tanto, la función de cuantía de la variable Z_i es:

z	-500	-300	-100	200	400	600
$P(Z_i = z)$	1/6	1/6	1/6	1/6	1/6	1/6

Obviamente, el beneficio obtenido tras lanzar el dado 500 veces está expresado por la variable $Z = Z_1 + Z_2 + \dots + Z_{500}$.

Se nos pide la probabilidad del suceso $Z > 23000$, lo que es bastante **imposible** sin calcular previamente la distribución de probabilidad de la variable "Z". Por eso, como es de bien nacidos ser agradecidos, postulamos para que Lindeberg-Levy sean elevados a los altares por ser autores del más delicado **latiguillo: como "Z" es suma de un elevado número de variables aleatorias independientes, todas con la misma distribución de probabilidad, con la misma media y la misma varianza, podemos aproximar la distribución de probabilidad de "Z" mediante la normal con media y varianza las de "Z"**, que son:

$$E(Z) = E\left(\sum_{i=1}^{500} Z_i\right) = \sum_{i=1}^{500} E(Z_i) = 500 \cdot E(Z_i) = 25000$$

$$E(Z_i) = -\frac{500}{6} - \frac{300}{6} - \frac{100}{6} + \frac{200}{6} + \frac{400}{6} + \frac{600}{6} = 50$$

$$V(Z) = V\left(\sum_{i=1}^{500} Z_i\right) = \sum_{i=1}^{500} V(Z_i) = 500 \cdot V(Z_i) = 500 \cdot 149167$$

$$V(Z_i) = E(Z_i^2) - (E(Z_i))^2 = \frac{910000}{6} - 50^2 = 149167$$

$$E(Z_i^2) = \frac{500^2}{6} + \frac{300^2}{6} + \frac{100^2}{6} + \frac{200^2}{6} + \frac{400^2}{6} + \frac{600^2}{6} = 910000/6$$

Por tanto:

$$P(Z < 23000) \cong P\left(N(25000; \sqrt{500 \cdot 149167}) < \underbrace{22950}\right) =$$

VENTANA

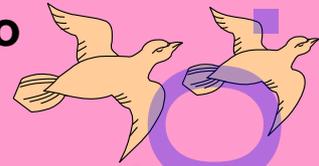
CORRECCIÓN POR CONTINUIDAD

Siendo 22900 y 23100 los valores anterior y posterior a 23000 que puede tomar "Z", consideramos que la "masa puntual" que tiene "Z" en el punto 23000 se corresponde con la "masa continua" que tiene la $N(25000; \sqrt{500 \cdot 149167})$ en el intervalo (22950; 23050).

Por tanto, como la probabilidad del suceso $Z = 23000$ no debe sumarse, al trabajar con la normal sólo consideramos la masa de probabilidad que hay a la izquierda del punto 22950

$$= P\left(N(0;1) < \frac{22950 - 25000}{\sqrt{500 \cdot 149167}}\right) = \dots$$

A tu profe le pasa como a ti: cuanto más clarito le explicas las cosas, más contento se pone.



¡Apuesto un brazo a que en este montón de exámenes casi nadie me lo explica todo clarito!

FONEMATO 1.6.4

Con independencia unos de otros, el tiempo de espera de un cliente en la cola de un banco tiene distribución exponencial de parámetro 0'05. Calcúlese la probabilidad de que el tiempo medio de espera de 2 clientes sea superior a 21, y la probabilidad de que el tiempo medio de espera de 100 clientes sea superior a 21.

SOLUCIÓN

- Si $X_i \approx \text{Exp.}(0'05)$ expresa el aleatorio tiempo de espera del i -ésimo cliente, el aleatorio tiempo medio de espera de 2 clientes está expresado por la variable $W = Z/2$, siendo $Z = X_1 + X_2$. Es:

$$P(W > 21) = P(Z/2 > 21) = P(Z > 42) = \int_{42}^{+\infty} \frac{0'05^2}{\Gamma(2)} \cdot z^{2-1} \cdot e^{-0'05 \cdot z} \cdot dz = \dots = 0'3796$$

Como $X_1 \approx \text{Exp.}(0'05) = G(1; 0'05)$ y $X_2 \approx \text{Exp.}(0'05) = G(1; 0'05)$ son independientes, entonces $Z = X_1 + X_2 \approx G(1 + 1; 0'05) = G(2; 0'05)$; así, la densidad de "Z" es $f(z) = \frac{0'05^2}{\Gamma(2)} \cdot z^{2-1} \cdot e^{-0'05 \cdot z}$, $z > 0$

- El aleatorio tiempo medio de espera de 100 clientes está expresado por la variable $X = T/100$, siendo $T = X_1 + \dots + X_{100}$. Es:

$$P(X > 21) = P(T/100 > 21) = P(T > 2100) = \int_{2100}^{+\infty} \frac{0'05^{100}}{\Gamma(100)} \cdot t^{100-1} \cdot e^{-0'05 \cdot t} \cdot dz = \text{infumable}$$

$T = X_1 + \dots + X_{100} \approx G(100; 0'05)$; así, la densidad de "T" es

$$g(t) = \frac{0'05^{100}}{\Gamma(100)} \cdot t^{100-1} \cdot e^{-0'05 \cdot t}, \quad t > 0$$

VENTANA

Latiguillo: como "X" es la media aritmética de un elevado número de variables aleatorias independientes, todas con la misma distribución de probabilidad, con la misma media y la misma varianza, según **Lindeberg-Levy**, podemos aproximar la distribución de probabilidad de "X" mediante la normal con media y varianza las de "X", que son:

$$E(X) = E\left(\frac{1}{100} \cdot \sum_{i=1}^{100} X_i\right) = \frac{1}{100} \cdot \sum_{i=1}^{100} E(X_i) = \frac{1}{100} \cdot 100 \cdot 20 = 20$$

$$E(X_i) = 20 ; V(X_i) = 400$$

$$V(X) = V\left(\frac{1}{100} \cdot \sum_{i=1}^{100} X_i\right) = \frac{1}{100^2} \cdot \sum_{i=1}^{100} V(X_i) = \frac{1}{100^2} \cdot 100 \cdot 400 = 4$$

Por tanto:

$$P(X > 21) \cong P(N(20; \sqrt{4}) > 21) = P(N(0; 1) > \frac{21-20}{2}) = 0'3085$$

FONEMATO 1.6.5

Con independencia unos días de otros, el número de casos de corrupción que se descubren cada día tiene distribución de Poisson de parámetro 4. Calcúlese la probabilidad de que el número medio de casos de corrupción en dos días sea superior a 4'5, y la probabilidad de que el número medio de casos de corrupción en 100 días sea superior a 4'5,

SOLUCIÓN

- Si $X_i \approx P(4)$ expresa el número de casos de corrupción que se descubren el i -ésimo día, el aleatorio número medio de casos en 2 días está expresado por la variable $W = Z/2$, siendo $Z = X_1 + X_2$. Es:

$$\begin{aligned} P(W > 4'5) &= P(Z/2 > 4'5) = P(Z > 9) = \\ &= 1 - P(Z \leq 9) = 1 - \sum_{z=0}^9 \frac{e^{-8} \cdot 8^z}{z!} = \dots = 0'2834 \end{aligned}$$

Como $X_1 \approx P(4)$ y $X_2 \approx P(4)$ son independientes, entonces $Z = X_1 + X_2 \approx P(4 + 4) = P(8)$; por tanto: $P(Z = z) = \frac{e^{-8} \cdot 8^z}{z!}$, $z = 0, 1, \dots$

- El número medio de casos en 100 días está expresado por $X = T/100$, siendo $T = X_1 + \dots + X_{100}$. Es:

$$\begin{aligned} P(X > 4'5) &= P(T/100 > 4'5) = P(T > 450) = \\ &= 1 - P(T \leq 450) = 1 - \sum_{t=0}^{450} \frac{e^{-400} \cdot 400^t}{t!} = \text{inf umable} \end{aligned}$$

$T = X_1 + \dots + X_{100} \approx P(400)$; así: $P(T = t) = \frac{e^{-400} \cdot 400^t}{t!}$, $t = 0, 1, \dots$

Latiguillo: como " X " es la media aritmética de un elevado número de variables aleatorias independientes, todas con la misma distribución de probabilidad, con la misma media y la misma varianza, según **Lindeberg-Levy**, podemos aproximar la distribución de probabilidad de " X " mediante la normal con media y varianza las de " X ", que son:

$$E(X) = E\left(\frac{1}{100} \cdot \sum_{i=1}^{100} X_i\right) = \frac{1}{100} \cdot \sum_{i=1}^{100} E(X_i) = \frac{1}{100} \cdot 100 \cdot 4 = 4$$

$$X_i \approx P(4) \Rightarrow E(X_i) = 4 \text{ y } V(X_i) = 4$$

$$V(X) = V\left(\frac{1}{100} \cdot \sum_{i=1}^{100} X_i\right) = \frac{1}{100^2} \cdot \sum_{i=1}^{100} V(X_i) = \frac{1}{100^2} \cdot 100 \cdot 4 = 0'04$$

Por tanto:

$$P(X > 4'5) \cong P(N(4; \sqrt{0'04}) > 4'5) = P(N(0;1) > \frac{4'5 - 4}{0'2}) = \dots$$

FONEMATO 1.6.6

Una máquina necesita para su funcionamiento una determinada válvula de la que hay en stock dos tipos A y B, en cantidades respectivas 220 y 300. Sin embargo, si empezamos a utilizar un tipo de válvula, ya no se puede mezclar ninguna del otro a no ser que paremos la máquina. La duración (en minutos) de cada válvula de tipo A es exponencial de media 5, mientras que la duración de cada válvula del tipo B tiene se distribuye (también minutos) de modo uniforme en el intervalo (0;6). Además, se considera que la duración de cada válvula es independiente de la duración de las demás. Una vez averiada la válvula que hace funcionar la máquina, ésta es sustituida inmediatamente por otra del mismo tipo modo automático. ¿Cuál es la probabilidad de que la máquina funcione ininterrumpidamente al menos 14'5 horas si trabaja con válvulas de tipo A? ¿Y si trabaja con válvulas tipo B?

SOLUCIÓN

- Si hay 220 válvulas del tipo A y $X_i \approx \text{Exp.}(0'2)$ expresa la duración de la i -ésima, el tiempo de funcionamiento ininterrumpido de la máquina está expresado por la variable $X = X_1 + \dots + X_{220}$, siendo:

$$E(X) = E\left(\sum_{i=1}^{220} X_i\right) = \sum_{i=1}^{220} E(X_i) = 220 \cdot 5 = 1100$$

$$X_i \approx \text{Exp.}P(0'2) \Rightarrow E(X_i) = 5 \text{ y } V(X_i) = 25$$

$$V(X) = V\left(\sum_{i=1}^{220} X_i\right) = \sum_{i=1}^{220} V(X_i) = 220 \cdot 25 = 5500$$

- Si hay 300 válvulas del tipo B y $Z_k \approx U(0;6)$ expresa la duración de la k -ésima, el tiempo de funcionamiento ininterrumpido de la máquina está expresado por la variable $Z = Z_1 + \dots + Z_{300}$, siendo:

$$E(Z) = E\left(\sum_{k=1}^{300} Z_k\right) = \sum_{k=1}^{300} E(Z_k) = 300 \cdot 3 = 900$$

$$Z_k \approx U(0;6) \Rightarrow E(Z_k) = (0+6)/2 = 3 \text{ y } V(Z_k) = (6-0)^2/12 = 3$$

$$V(Z) = V\left(\sum_{k=1}^{300} Z_k\right) = \sum_{k=1}^{300} V(Z_k) = 300 \cdot 3 = 900$$

- **Latiguillo:** tanto "X" como "Z" son suma de un elevado número de variables aleatorias independientes, todas con la misma distribución de probabilidad, con la misma media y la misma varianza; en consecuencia, según Lindeberg-Levy, podemos aproximar la distribución de probabilidad de "X" mediante la normal con media y varianza las de "X", y la distribución de probabilidad de "Z" podemos aproximarla mediante la normal con media y varianza las de "Z". Así:

$$P(X > 14'5.60) \cong P\left(N(1100; \sqrt{5500}) > 14'5.60\right) = \dots$$

$$P(Z > 14'5.60) \cong P\left(N(900; \sqrt{900}) > 14'5.60\right) = \dots$$

FONEMATO 1.6.7

El tiempo (en horas) que tarda una máquina en realizar un ciclo de trabajo tiene densidad $f(x) = 2 \cdot x$, $0 < x < 1$. Calcúlese la probabilidad de que la máquina tarde más de 40 horas en realizar 45 ciclos.

SOLUCIÓN

Si X_i expresa el tiempo empleado en el i -ésimo ciclo, es:

$$E(X_i) = \int_0^1 x \cdot f(x) \cdot dx = 2 \cdot \int_0^1 x^2 \cdot dx = \frac{2}{3}$$

$$V(X_i) = E(X_i^2) - (E(X_i))^2 = \frac{1}{2} - \frac{4}{9} = \frac{1}{18}$$

$$E(X_i^2) = \int_0^1 x^2 \cdot f(x) \cdot dx = 2 \cdot \int_0^1 x^3 \cdot dx = \frac{1}{2}$$

El tiempo en realizar 45 ciclos está expresado por $X = X_1 + \dots + X_{45}$, siendo:

$$E(X) = E\left(\sum_{i=1}^{45} X_i\right) = \sum_{i=1}^{45} E(X_i) = 45 \cdot \frac{2}{3} = 30$$

$$V(X) = V\left(\sum_{i=1}^{45} X_i\right) = \sum_{i=1}^{45} V(X_i) = 45 \cdot \frac{1}{18} = \frac{5}{2}$$

suponiendo que X_1, \dots, X_{45} son independientes

Latiguello: como " X " es suma de un elevado número de variables aleatorias independientes, todas con la misma distribución de probabilidad, con la misma media y la misma varianza, según Lindeberg-Levy, podemos aproximar la distribución de probabilidad de " X " mediante la normal con media y varianza las de " X ". Por tanto:

$$P(X > 40) \cong P(N(30; \sqrt{5/2}) \geq 40) = \dots$$



FONEMATO 1.6.8

Determine el percentil 90 de la variable $X \approx \chi_{30}^2$ y compare el resultado con el obtenido mediante la aproximación de Lindeberg-Levy.

SOLUCIÓN

La tabla de la función de distribución de la variable χ_{30}^2 indica que el punto "c" tal que $P(\chi_{30}^2 \leq c) = 0.9$ es $c = 40.3$.

Si $X_i \approx \chi_1^2$ y X_1, \dots, X_{30} son independientes, sabemos que

$$X = X_1 + \dots + X_{30} \approx \chi_{30}^2$$

siendo

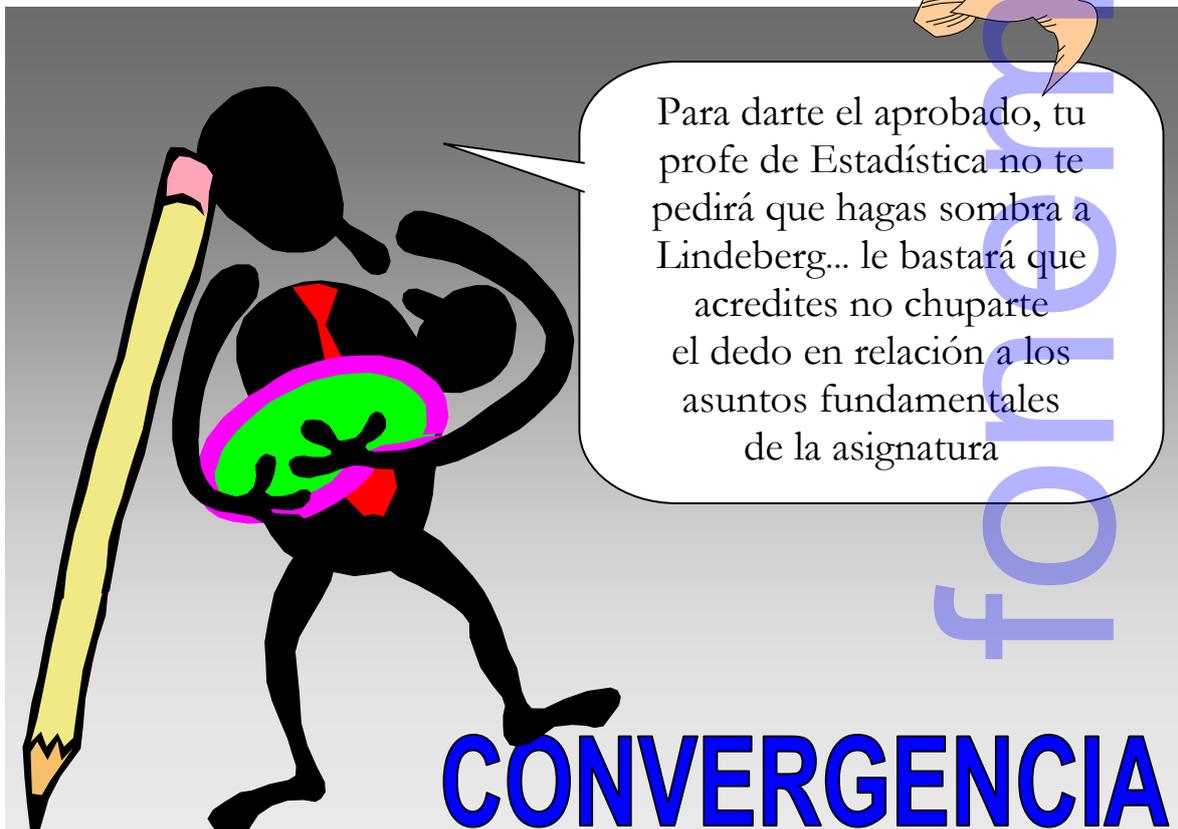
$$E(X) = 30 ; V(X) = 60 \text{ y}$$

pues $E(\chi_n^2) = n$ y $V(\chi_n^2) = 2n$.

Según Lindeberg-Levy, podemos aproximar la distribución de probabilidad de $X \approx \chi_{30}^2$ mediante la normal con media y varianza las de "X".

Por tanto:

$$\begin{aligned} P(\chi_{30}^2 \leq c) &\cong P(N(30; \sqrt{60}) \leq c) = 0.9 \Rightarrow \\ &\Rightarrow P\left(N(0; 1) \leq \frac{c-30}{\sqrt{60}}\right) = 0.9 \Rightarrow \\ &\Rightarrow \frac{c-30}{\sqrt{60}} = 1.28 \Rightarrow c = 39.91 \end{aligned}$$



FONEMATO 1.6.9

Sean X_1, \dots, X_{100} variables independientes, todas con la misma distribución de probabilidad, con media 75 y varianza 225.

- 1) Utilícese la desigualdad de Tchebychef para acotar la probabilidad de que su media aritmética no difiera de 75 en más de 6. Compárese el resultado con el obtenido mediante la aproximación de Lindeberg-Levy.
- 2) Mediante la desigualdad de Tchebychef, determínese la cota que con probabilidad no inferior a 0'75 no es superada por la desviación de la media aritmética respecto a 75. Compárese el resultado con el obtenido mediante la aproximación de Lindeberg-Levy.

SOLUCIÓN

1) Siendo $X = (X_1 + \dots + X_{100})/100$, es:

$$E(X) = E\left(\frac{1}{100} \cdot \sum_{i=1}^{100} X_i\right) = \frac{1}{100} \cdot \sum_{i=1}^{100} E(X_i) = \frac{1}{100} \cdot 100 \cdot 75 = 75$$

$E(X_i) = 75$ y $V(X_i) = 225$

$$V(X) = V\left(\frac{1}{100} \cdot \sum_{i=1}^{100} X_i\right) = \frac{1}{100^2} \cdot \sum_{i=1}^{100} V(X_i) = \frac{1}{100^2} \cdot 100 \cdot 225 = 2'25$$

Según Tchebychef:

$$P(|X - 75| < 6) = P(|X - E(X)| < 6) \geq 1 - \frac{V(X)}{6^2} = 1 - \frac{2'25}{6^2} = 0'9375$$

Según Lindeberg-Levy, podemos aproximar la distribución de probabilidad de "X" mediante la normal con media y varianza las de "X". Por tanto:

$$P(|X - 75| < 6) \cong P(|N(75; \sqrt{2'25}) - 75| < 6) = P\left(|N(0;1)| < \frac{6}{\sqrt{2'25}}\right) = 1$$

2) Debemos determinar "c" de modo que $P(|X - 75| \leq c) \geq 0'75$.

$$P(|X - 75| \leq c) = P(|X - E(X)| \leq c) \geq 1 - \frac{V(X)}{c^2} = 1 - \frac{2'25}{c^2} \geq 0'75 \Rightarrow c \geq 3$$

\uparrow
Tchebychef

Aproximando la distribución de probabilidad de "X" mediante la normal con media y varianza las de "X":

$$\begin{aligned} P(|X - 75| \leq c) &\cong P(|N(75; \sqrt{2'25}) - 75| \leq c) = \\ &= P\left(|N(0;1)| \leq \frac{c}{\sqrt{2'25}}\right) \geq 0'75 \Rightarrow P\left(N(0;1) \leq \frac{c}{\sqrt{2'25}}\right) \geq 0'875 \Rightarrow \\ &\Rightarrow \frac{c}{\sqrt{2'25}} \geq 1'15 \Rightarrow c \geq 1'725 \end{aligned}$$

FONEMATO 1.6.10

El número de clientes que entran cada día a la farmacia "A" tiene distribución de Poisson de parámetro 20, y para la farmacia "B" tiene distribución $B(30;0'7)$.

- 1) Calcúlese la probabilidad de que el número medio diario de clientes de "A" durante 100 días se desvíe del número medio diario de clientes de "B" durante 200 días en menos de dos.
- 2) ¿Qué cota no superará dicha desviación con probabilidad 0'95?

SOLUCIÓN

- 1) Si $X_i \approx P(20)$ es el número de clientes de "A" el i -ésimo día, el número medio de clientes diarios durante 100 días lo expresa $X = (X_1 + \dots + X_{100})/100$. Supuesto que las variables X_1, \dots, X_{100} son independientes, podemos aproximar (Lindeberg-Levy) la distribución de probabilidad de "X" mediante la normal con media y varianza las de "X", que son:

$$E(X) = E(X_i) = 20 ; V(X) = V(X_i)/100 = 0'2$$

$$X_i \approx P(20) \Rightarrow E(X_i) = 20 \text{ y } V(X_i) = 20$$

- Si $Z_k \approx B(30;0'7)$ es el número de clientes de "B" el k -ésimo día, el número medio de clientes diarios durante 200 días es $Z = (Z_1 + \dots + Z_{200})/200$. Supuesto que las variables Z_1, \dots, Z_{200} son independientes, podemos aproximar (Lindeberg-Levy) la distribución de probabilidad de "Z" mediante la normal con media y varianza las de "Z", que son:

$$E(Z) = E(Z_k) = 21 ; V(Z) = V(Z_k)/200 = 6'3$$

$$Z_k \approx B(30;0'7) \Rightarrow E(Z_k) = 30 \cdot 0'7 = 21 \text{ y } V(Z_k) = 30 \cdot 0'7 \cdot 0'3 = 6'3$$

- El número medio diario de clientes de "A" durante 100 días se desviará del número medio diario de clientes de "B" durante 200 días en menos de dos si ocurre el suceso $|X - Z| < 2$, siendo:

$$P(|X - Z| < 2) = P(|N(-1; \sqrt{6'5})| < 2) =$$

VENTANA

supuesto que $X \approx N(20; \sqrt{0'2})$ y $Z \approx N(21; \sqrt{6'3})$ son independientes, la distribución de probabilidad de $X - Z$ es normal, siendo:

$$E(X - Z) = E(X) - E(Z) = 20 - 21 = -1$$

$$V(X - Z) = V(X) + V(Z) = 0'2 + 6'3 = 6'5$$

$$= P\left(|N(0;1)| < \frac{2 - (-1)}{\sqrt{6'5}}\right) = 2 \cdot P\left(N(0;1) < \frac{2 - (-1)}{\sqrt{6'5}}\right) - 1 = \dots$$

- 2) Debemos calcular "c" de modo que $P(|X - Z| \leq c) = 0'95$:

$$P(|X - Z| \leq c) = P\left(|N(0;1)| \leq \frac{c - (-1)}{\sqrt{6'5}}\right) = 0'95 \Rightarrow \frac{c - (-1)}{\sqrt{6'5}} = 1'96 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow c = 1'96 \cdot \sqrt{6'5} - 1$$

1.7 TEOREMA DE MOIVRE

Sea $\{X_n\}$ una sucesión de variables aleatorias independientes, con distribución de Bernoulli de parámetro "p". Si $\{S_n\}$ es la sucesión de variables aleatorias tales que $S_1 = X_1$, $S_2 = X_1 + X_2$, ..., $S_n = X_1 + X_2 + \dots + X_n$, ... es claro que:

$$S_1 \approx B(1;p) ; S_2 \approx B(2;p) ; \dots ; S_n \approx B(n;p) ; \dots$$

Así, como $E(S_n) = n.p$ y $V(S_n) = n.p.q$ (siendo $q = 1 - p$), la sucesión $\{Z_n\}$ de variables tipificadas correspondiente a $\{S_n\}$ es tal que $Z_n = (S_n - n.p)/\sqrt{n.p.q}$, y Moivre demostró que $\{Z_n\} \xrightarrow{L} N(0;1)$, demostrando que la f.g.m de Z_n tiende a la f.g.m de la variable $N(0;1)$. En efecto:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \Phi_{Z_n}(t) = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{t^2/2}{n} + \frac{\text{lo que sea}}{n^{3/2}} + \frac{\text{lo que sea}}{n^{5/2}} + \dots \right)^n = (1^\infty) =$$

VENTANA

$$\begin{aligned} \Phi_{Z_n}(t) &= E(e^{t \cdot Z_n}) = E\left(e^{t \cdot (S_n - n.p)/\sqrt{n.p.q}}\right) = \\ &= E(e^{\text{Pepe} \cdot S_n}) = \Phi_{S_n}(\text{Pepe}) \\ &= e^{-t \cdot n.p/\sqrt{n.p.q}} \cdot E\left(e^{t \cdot S_n/\sqrt{n.p.q}}\right) = e^{-t \cdot n.p/\sqrt{n.p.q}} \cdot \Phi_{S_n}\left(t/\sqrt{n.p.q}\right) = \\ &= e^{-t \cdot n.p/\sqrt{n.p.q}} \cdot \left(q + p \cdot e^{t/\sqrt{n.p.q}} \right)^n \\ &= \left(q \cdot e^{-t.p/\sqrt{n.p.q}} + p \cdot e^{t \cdot (1-p)/\sqrt{n.p.q}} \right)^n = \left(q \cdot e^{-t.p/\sqrt{n.p.q}} + p \cdot e^{t.q/\sqrt{n.p.q}} \right)^n = \\ &= \left(q \cdot \left(1 - \frac{t.p}{\sqrt{n.p.q}} + \frac{(t.p)^2}{2 \cdot n.p.q} - \dots \right) + p \cdot \left(1 + \frac{t.q}{\sqrt{n.p.q}} + \frac{(t.q)^2}{2 \cdot n.p.q} + \dots \right) \right)^n = \\ &= \left(1 + \frac{t^2/2}{n} + \frac{\text{lo que sea}}{n^{3/2}} + \frac{\text{lo que sea}}{n^{5/2}} + \dots \right)^n \end{aligned}$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (a_n)^{b_n} = (1^\infty) = e^{\lim_{n \rightarrow \infty} b_n \cdot (a_n - 1)}$$

f.g.m. de la variable $N(0;1)$

$$= \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{t^2}{2} + \frac{\text{lo que sea}}{n^{1/2}} + \frac{\text{lo que sea}}{n^{3/2}} + \dots \right) = e^{t^2/2}$$

Obviamente, si $\{Z_n\} \xrightarrow{L} N(0;1)$ entonces $\{S_n\} \xrightarrow{L} N(n.p; \sqrt{n.p.q})$.

La aproximación de la $B(n;p)$ mediante la $N(n.p; \sqrt{n.p.q})$ no debe emplearse si "p" es próximo a 0 o a 1; en otros casos la aproximación es buena si "n.p" y "n.q" son superiores a 5.

Tema 1: Sucesiones de variables aleatorias

© Rafael Cabrejas Hermansanz

FONEMATO 1.7.1

El 20 % de las ventas de una empresa son al contado. Si en un mes se realizan 1000 ventas, determínese la probabilidad de que como máximo 250 hayan sido al contado?

SOLUCIÓN

Llamando "éxito" al suceso de que una venta sea al contado, si $P(\text{éxito}) = 0'2$, la variable X_i que expresa el número de "éxitos" (0 ó 1) en la i -ésima venta tiene distribución de Bernoulli de parámetro $0'2$; así, la variable $X = X_1 + \dots + X_{1000}$ que expresa el número de "éxitos" en 1000 ventas tiene distribución $B(1000; 0'2)$, supuesto que X_1, \dots, X_{1000} son independientes.

La función de cuantía de "X" es:

$$P(X = x) = \binom{1000}{x} \cdot 0'2^x \cdot (1 - 0'2)^{1000-x}, \quad x = 0, 1, \dots, 1000$$

Por tanto:

$$P(X \leq 250) = \sum_{x=0}^{250} \binom{1000}{x} \cdot 0'2^x \cdot (1 - 0'2)^{1000-x}$$

Como se nos hiela la sangre al pensar en el petardo de calcular tan espantosa suma, bendecimos a Lindeberg-Levy (versión Moivre) entonando su hermoso **latiguillo**: siendo "X" la suma de un elevado número de variables aleatorias independientes, todas con la misma distribución de probabilidad, con la misma media y la misma varianza, podemos aproximar la distribución de probabilidad de "X" mediante la normal con media y varianza las de "X", que son:

$$E(X) = 1000 \cdot 0'2 = 200 ; \quad V(X) = 1000 \cdot 0'2 \cdot (1 - 0'2) = 160$$

$$\boxed{\text{Si } X \approx B(n; p) \text{ es } E(X) = n \cdot p \text{ y } V(X) = n \cdot p \cdot (1 - p)}$$

Por tanto:

$$P(X \leq 250) \cong P\left(N(200; \sqrt{160}) \leq \underbrace{250'5}\right) =$$

VENTANA

CORRECCIÓN POR CONTINUIDAD

Al aproximar la distribución discreta $X \approx B(1000; 0'2)$ mediante la $N(200; \sqrt{160})$, consideramos que la "masa puntual" que tiene $X \approx B(1000; 0'2)$ en el punto 250 se corresponde con la "masa continua" que tiene la $N(200; \sqrt{160})$ en el intervalo $(249'5; 250'5)$.
Por tanto, como la probabilidad del suceso $X = 250$ debe sumarse, al trabajar con la normal consideramos la masa de probabilidad que hay a la izquierda del punto $250'5$

$$= P\left(N(200; \sqrt{160}) \leq \frac{250'5 - 200}{\sqrt{160}}\right) = \dots$$

FONEMATO 1.7.2

La probabilidad de que en una ciudad y durante un año en un parto nazca un varón es 0'48. Si la probabilidad de que nazcan 1000 o más varones es 0'1711, determínese el número "n" de nacimientos que se han producido en esa ciudad durante el año en cuestión.

SOLUCIÓN

Llamando "éxito" al suceso de que nazca un varón, si $P(\text{éxito}) = 0'48$, la variable X_i que expresa el número de "éxitos" (0 ó 1) en el i-ésimo nacimiento tiene distribución de Bernouilli de parámetro 0'48; así, la variable $X = X_1 + \dots + X_n$ que expresa el número de "éxitos" en los "n" nacimientos del año tiene distribución $B(n; 0'48)$, supuesto que X_1, \dots, X_n son independientes.

La función de cuantía de "X" es:

$$P(X = x) = \binom{n}{x} \cdot 0'48^x \cdot (1 - 0'48)^{n-x}, \quad x = 0, 1, \dots, n$$

Para calcular "n" basta exigir que $P(X \geq 1000) = 0'1711$, o lo que es igual, exigir que $P(X < 1000) = 0'8289$; es decir:

$$\sum_{x=0}^{999} \binom{n}{x} \cdot 0'48^x \cdot (1 - 0'48)^{n-x} = 0'8289$$

Como se nos hiela el alma al pensar en el petardo de resolver tan espantosa ecuación, glorificamos a Lindeberg-Levy (versión Moivre) recitando su onírico **latiguillo**: como "X" es suma de un elevado número de variables independientes, todas con igual distribución de probabilidad, igual media e igual varianza, aproximamos la distribución de probabilidad de "X" mediante la normal de media y varianza las de "X", que son $E(X) = 0'48 \cdot n$ y $V(X) = n \cdot 0'48 \cdot (1 - 0'48) = 0'2496 \cdot n$, pues si $X \approx B(n; p)$ es $E(X) = n \cdot p$ y $V(X) = n \cdot p \cdot (1 - p)$.

Por tanto:

Corrección por continuidad: la "masa puntual" que tiene $X \approx B(n; 0'48)$, en el punto 1000 se corresponde con la "masa continua" que tiene la $N(0'48 \cdot n; \sqrt{0'2496 \cdot n})$ en el intervalo (999'5; 1000'5). Por tanto, como la probabilidad del suceso $X = 1000$ no debe sumarse, al trabajar con la normal consideramos la masa de probabilidad que hay a la izquierda del punto 999'5

$$P(X < 1000) \cong P\left(N(0'48 \cdot n; \sqrt{0'2496 \cdot n}) < \underbrace{999'5}_{\downarrow}\right) = 0'8289 \Rightarrow$$
$$\Rightarrow P\left(N(0; 1) \leq \frac{999'5 - 0'48 \cdot n}{\sqrt{0'2496 \cdot n}}\right) = 0'8289 \Rightarrow \frac{999'5 - 0'48 \cdot n}{\sqrt{0'2496 \cdot n}} = 0'95 \Rightarrow n = \dots$$

FONEMATO 1.7.3

Con independencia unos días de otros, la aleatoria venta diaria de vino (en miles de litros) de una bodega tiene distribución $U(0;2)$, obteniendo beneficio la empresa sólo si la venta es superior a 1'5. Si se consideran 200 días, determínese el 60 percentil del número de días en que no se obtiene beneficio.

SOLUCIÓN

Llamando "éxito" al suceso de que un día la empresa no obtenga beneficio, es:

$$P(\text{éxito}) = P(U(0;2) \leq 1'5) = \int_0^{1'5} \frac{1}{2} \cdot dx = 0'75$$

La variable X_i que expresa el número de "éxitos" (0 ó 1) el i -ésimo día tiene distribución de Bernoulli de parámetro 0'75; así, la variable $X = X_1 + \dots + X_{200}$ que expresa el número de "éxitos" en 200 días es $B(200;0'75)$, supuesto que X_1, \dots, X_{200} son independientes.

La función de cuantía de "X" es:

$$P(X = x) = \binom{200}{x} \cdot 0'75^x \cdot (1 - 0'75)^{200-x}, \quad x = 0, 1, \dots, 200$$

Debemos determinar "c" de modo que $P(X \leq c) \geq 0'6$, y al exigir que se satisfaga dicha condición, resulta:

$$P(X \leq c) = \sum_{x=0}^{c-1} \binom{200}{x} \cdot 0'75^x \cdot 0'25^{200-x} \leq 0'6 \Rightarrow \text{infumable}$$

Latiguillo de Lindeberg-Levy (versión Moivre): como "X" es suma de un elevado número de variables independientes, todas con la misma distribución de probabilidad, con la misma media y la misma varianza, podemos aproximar la distribución de probabilidad de "X" mediante la normal con media y varianza las de "X", que son $E(X) = 200 \cdot 0'75 = 150$ y $V(X) = 200 \cdot 0'75 \cdot (1 - 0'75) = 37'5$, pues si $X \approx B(n; p)$ es $E(X) = n \cdot p$ y $V(X) = n \cdot p \cdot (1 - p)$.

Por tanto:

$$P(X \leq c) \cong P\left(N(150; \sqrt{37'5}) \leq \underbrace{c + 0'5}_{\uparrow}\right) = 0'6 \Rightarrow$$

Corrección por continuidad: como la probabilidad del suceso $X = c$ debe sumarse, al trabajar con la normal consideramos la masa de probabilidad que hay a la izquierda del punto $c+0'5$

$$\begin{aligned} \Rightarrow P\left(N(0;1) \leq \frac{c + 0'5 - 150}{\sqrt{37'5}}\right) &= 0'6 \Rightarrow \\ \Rightarrow \frac{c + 0'5 - 150}{\sqrt{37'5}} &= 0'36 \Rightarrow c = \dots \end{aligned}$$

FONEMATO 1.7.4

La probabilidad de que un estudiante se chupe el dedo hasta el codo es 0'7. Observados 300 estudiantes, determínese la probabilidad de que entre 230 y 250 se chupen el dedo hasta el codo.

SOLUCIÓN

Llamando "éxito" al suceso de chuparse el dedo, si $P(\text{éxito}) = 0'7$, la variable X_i que expresa el número de "éxitos" (0 ó 1) con el i -ésimo estudiante tiene distribución de Bernouilli de parámetro 0'7, y la variable $X = X_1 + \dots + X_{300}$ que expresa el número de "éxitos" en 300 estudiantes tiene distribución $B(300; 0'7)$, supuesto que X_1, \dots, X_{300} son independientes.

La función de cuantía de "X" es:

$$P(X = x) = \binom{300}{x} \cdot 0'7^x \cdot (1 - 0'7)^{300-x}, \quad x = 0, 1, \dots, 300$$

Es:

$$P(230 < X < 250) = \sum_{x=231}^{249} \binom{300}{x} \cdot 0'7^x \cdot 0'3^{300-x}$$

Como nos desagrada hacer sumas petardas, recitamos el **latiguillo** de Lindeberg-Levy (versión Moivre): **siendo "X" la suma de un elevado número de variables aleatorias independientes, todas con la misma distribución de probabilidad, con la misma media y la misma varianza, podemos aproximar la distribución de probabilidad de "X" mediante la normal con media y varianza las de "X", que son:**

$$E(X) = 300 \cdot 0'7 = 210 ; \quad V(X) = 300 \cdot 0'7 \cdot (1 - 0'7) = 63$$

$$X \approx B(n;p) \Rightarrow E(X) = n \cdot p \text{ y } V(X) = n \cdot p \cdot (1 - p)$$

Por tanto:

$$P(230 < X < 250) \cong P\left(\underbrace{230'5}_{\uparrow} < N(210; \sqrt{63}) < \underbrace{249'5}_{\uparrow}\right) =$$

Corrección por continuidad: como la probabilidad de los sucesos $X = 230$ y $X = 250$ no debe sumarse, al trabajar con la normal consideramos la masa de probabilidad que en el intervalo $(230'5; 249'5)$

$$= P\left(\frac{230'5 - 210}{\sqrt{63}} < N(0;1) < \frac{249'5 - 210}{\sqrt{63}}\right) = \dots$$

FONEMATO 1.7.5

La duración (horas) de un tipo de fusible es $N(2000;200)$. Los fusibles se empaquetan en lotes de 10, y se considera un lote defectuoso si tiene 2 o más fusibles que duran menos de 1790 horas. Halle la probabilidad de rechazar un embarque de 1000 lotes si se acepta cuando contiene menos de 150 lotes defectuosos.

SOLUCIÓN

Llamando "éxito" al suceso de que un fusible dure menos de 1790 horas, es:

$$P(\text{éxito}) = P(N(2000;200) < 1790) = P(N(0;1) < (1790 - 2000)/200) = 0'1469$$

Así, la variable X_i que expresa el número de "éxitos" (0 ó 1) con el i -ésimo fusible es de Bernouilli de parámetro 0'1469; por ello, la variable $X = X_1 + \dots + X_{10}$ que expresa el número de "éxitos" en un lote de 10 fusibles es $B(10;0'1469)$, supuesto que X_1, \dots, X_{10} son independientes. La función de cuantía de "X" es

$$P(X = x) = \binom{10}{x} \cdot 0'1469^x \cdot (1 - 0'1469)^{10-x}, \quad x = 0, 1, \dots, 10$$

Siendo "A" el suceso de que un lote sea defectuoso, es:

$$P(A) = P(X \geq 2) = 1 - P(X = 0) - P(X = 1) = \dots = 0'1238$$

Llamando ahora "éxito" al suceso de que un lote sea defectuoso (ocurre "A"), si $P(\text{éxito}) = 0'1238$, la variable Z_k que expresa el número de "éxitos" (0 ó 1) con el k -ésimo lote es de Bernouilli con parámetro 0'1238, y $Z = Z_1 + \dots + Z_{1000}$ que expresa el número de "éxitos" en 1000 lotes tiene distribución $B(1000;0'1238)$, supuesto que Z_1, \dots, Z_{1000} son independientes. La función de cuantía de "Z" es:

$$P(Z = z) = \binom{1000}{z} \cdot 0'1238^z \cdot (1 - 0'1238)^{1000-z}, \quad z = 0, 1, \dots, 1000$$

Siendo "B" el suceso de rechazar el embarque, es:

$$P(B) = 1 - P(\bar{B}) = 1 - P(Z < 150) = 1 - \sum_{z=0}^{149} \binom{1000}{z} \cdot 0'1238^z \cdot (1 - 0'1238)^{1000-z}$$

Como odiamos las sumas petardas, declamamos el **latiguillo** de Lindeberg-Levy (versión Moivre): **siendo "Z" la suma de un elevado número de variables independientes, todas con la misma distribución de probabilidad, con la misma media y la misma varianza, podemos aproximar la distribución de probabilidad de "Z" mediante la normal con media y varianza las de "Z", que son:**

$$E(Z) = 1000 \cdot 0'1238 = 123'8 ; \quad V(Z) = 1000 \cdot 0'1238 \cdot (1 - 0'1238) = 108'47$$

$$U \approx B(n;p) \Rightarrow E(U) = n \cdot p \text{ y } V(U) = n \cdot p \cdot (1 - p)$$

Así:
$$P(B) = 1 - P(Z < 150) \cong 1 - P\left(N(123'8; \sqrt{108'47}) < \underbrace{149'5}\right) =$$

Corrección por continuidad: como la probabilidad de suceso $Z = 150$ no debe sumarse, al trabajar con la normal consideramos la masa de probabilidad a la izquierda de 149'5

$$= 1 - P\left(N(0;1) < (149'5 - 123'8) / \sqrt{108'47}\right) = \dots$$